

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

052410

色彩工程-投影機大解構

學校名稱：國立金門高級中學

作者： 高三 翁子恒 高三 陳丕堯 高三 莊育瑄	指導老師： 李育賢 黃國賓
---	-----------------------------

關鍵詞：可見光譜、色域、分光稜鏡

摘要

本作品比較不同類型顯示器（傳統投影機、LED 投影機、雷射投影機及電腦螢幕等）的顯色效果差異。最初使用光柵、分光稜鏡、雷射筆等實驗來確定投影機的原理，接著透過色票統一標準，使用光譜儀將結果數據化，再進一步將 VGA 線的三原色（紅綠藍，以下用 RGB 代表）傳輸端子剪除，共有六種組合(去 R、去 G、去 B，留 R、留 B、留 G)，對比不同投影機之間的實驗結果，並配合其他顯示器實驗來驗證我們的構想。

實驗發現雷射投影機的綠光是由紅光變頻而來。此外，數據顯示雷射投影機的演色性，相對其他類型投影機來的低，對比後確認是光譜與太陽黑體輻射不同所導致。同時，我們還量測各種不同的顯示器，或是對照各種壽命之機器，試著分析出其中的物理結果。

研究動機

上課時物理老師使用投影機播放有趣的物理影片，但是除了物理影片以外，我更好奇的是投影機的原理是什麼，於是我找了相關的資料發現除了傳統投影機，更有雷射投影機這樣的商品。然而，就投影效果而言，雷射投影機比上一般傳統投影機的優勢在哪呢？網路上並沒有確切的數據，國內外網站也都沒有相關的實驗資料。正巧，學校近期也淘汰了一批舊的投影機，還有許多閒置的 VGA 線，給了好奇心十足的我們一個好機會來進行實驗，如果我們能夠將色度、飽和度等色彩數據化，或許就能夠得知兩者的差異。為了可以真正了解投影機的原理，我們展開了實驗，並配合精密的測量與數據的探討。

研究目的

- 一、了解不同投影機的原理。
- 二、比較不同投影機之間的效果（顯色性、演色性等）。
- 三、了解各種色彩分析中會用到的專有名詞。
- 四、探討剪除 VGA 三原色訊號端子後，不同投影機的結果差異。
- 五、探討電腦螢幕的藍光強度是否相較投影機強。
- 六、比較不同壽命同款投影機的效果。

實驗設備與器材

VGA 線數條、鉗子、傳統投影機、LED 投影機、雷射投影機、三色雷射筆、三原色 LED 燈泡、光柵眼鏡、筆電、光譜精靈軟體

研究方法

一、CIE-1931(色溫圖)

CIE-1931 圖(或稱「色溫圖」、「色度座標圖」)是本次實驗中，一項用來比較不同光源的判斷工具，除了該光源的主波長、色純度可以被明確標示之外，更重要的是可以從當中比較色度座標。CIE-1931 圖由國際照明委員會 (CIE) 於 1931 年創立，其採用一種數學方式來定義色彩空間。色彩空間指的是用一種客觀的方式敘述顏色在人眼上的感覺，人類眼睛有對於短 (S, 420-440nm)、中 (M, 530-540nm) 和長 (L, 560-580nm) 波長的光感受器 (稱為視錐細胞)。因此，首先先定義三種主要顏色，再利用顏色疊加模型，根據三種視錐細胞的刺激比例，即可敘述各種顏色。

CIE-1931 圖中的曲線為黑體軌跡 (又稱普朗克軌跡)，由於光源的色溫是通過對比它的色彩和理論的熱黑體輻射體來確定的，因此若要比較不同數據的演色性，可藉由觀察色度座標與黑體軌跡之間的關係來判斷。

二、名詞解釋

(一)相關色溫 CCT：對比它的色彩和理論的熱黑體輻射體來確定的，匹配時的凱爾文溫度就是那個光源的色溫，它直接和普朗克黑體輻射定律相聯繫。

(二)色偏差值 D_{uv} ：色彩偏移普朗克軌跡的距離與方向 D_{uv} 越趨近零越接近理想值。

(三)色光三原色：以光源投射時所使用的色彩是屬於「疊加型」的原色系統，此系統中包含了紅(R)、綠(G)、藍(B)三種原色，三原色強度均調至最大並且等量重疊時，則會呈現白色。

(四)峰值波長：所測光源的相對強度為 1.0 處的對應波長，即為峰值波長。以下圖為例：峰值波長即為 453nm，呈現藍光。

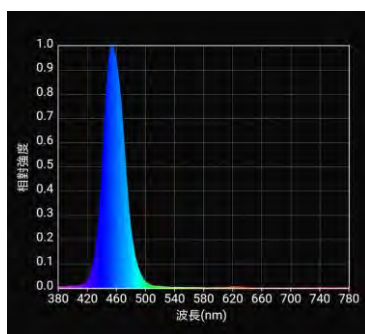


圖 1、峰值波長示意圖

(五)演色性 CRI：物體在光源下感受與太陽光下感受的真實度百分比，演色性高對顏色表現較逼真。

(六)類色溫 (Correlated Color Temperature)：一般談到人工光源的顏色，往往會提到兩個指標：色溫 (Color Temperature) 和演色性 (Color Rendering Index)，這兩個指標又可以整合成單一指標 – 類色溫。

(七)主波長：主波長為表達顏色的方法之一，在得到所測光源的色度座標後，將其在色度空間圖上與 E 光源色度點(白光、5500K)連線，而此延長線與光譜軌跡(馬蹄形)相交的波長值即稱之為該光源的主波長。主波長並不全然等於峰值波長。

以下圖為例：黃點為所測光源之色度點，白點為 E 光源色度點，其連線延伸上的箭頭所指處則為主波長數值。主波長為 525nm，呈現綠光。

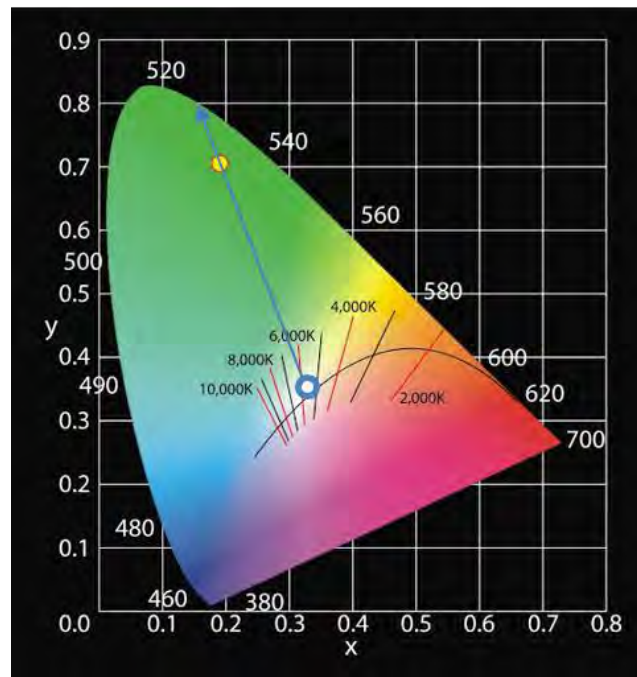


圖 2、色溫圖上色度點對應波長說明圖

(八)色純度：以主波長描述顏色時，色純度可作輔助表示，以百分比計。定義為：

$$\frac{\text{所測色度坐標與 E 光源色度坐標的直線距離}}{\text{所測主波長之光譜軌跡色度坐標與 E 光源色度坐標的直線距離}} \times 100\%$$

色純度越高，代表所測光源的色度坐標越接近該主波長的光譜色。色純度越高，色彩給人感覺較為鮮豔；色純度越低，色彩給人感覺較為灰暗。

三、光柵眼鏡觀察雷射投影機與傳統投影機白光亮點之差異

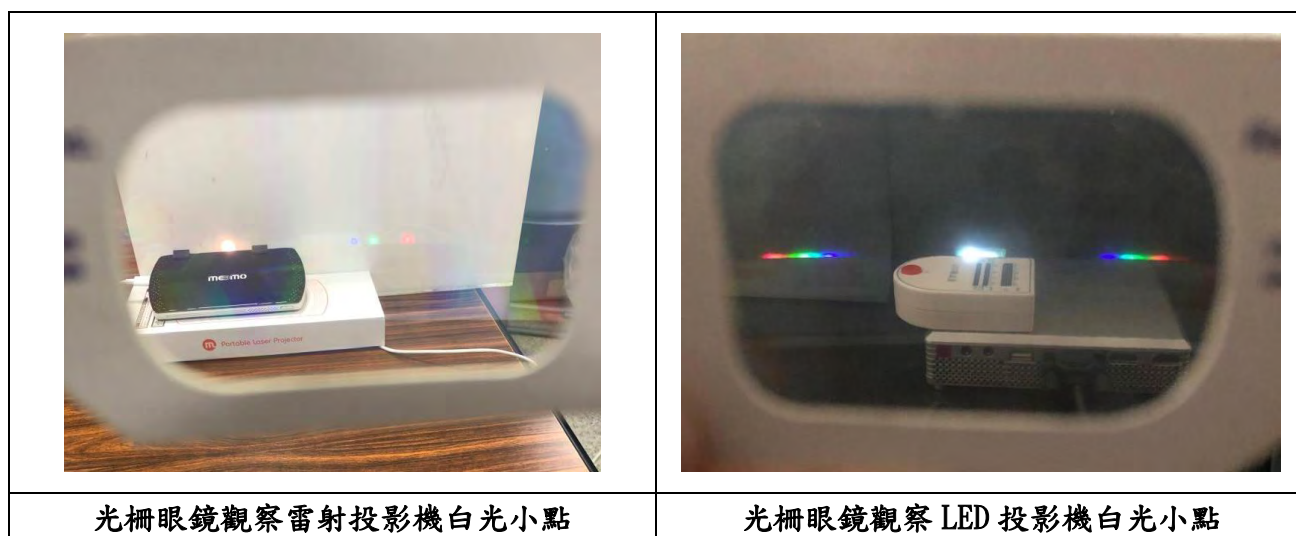


圖 3、光柵眼鏡觀察投影機白色點光源

為了簡單驗證投影機成像的差異，我們以 500lines/mm 光柵眼鏡觀察雷射投影機白光小點，即 d 為 $0.001m \div 500 = 2 \times 10^{-6}$ 可以發現雷射投影機的白光小點在光柵眼鏡中可以明確的分成 RGB 三原色小點，LED 投影機則幾乎為連續的光譜。我們由高中物理課本可以得知干涉的公式可以得知：

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d} \quad \text{可以得到} \quad \lambda = \frac{\Delta y \cdot d}{L}$$

此公式可以推論兩款投影機的色彩分佈是 LED 較為均勻，且各式波長都有，不像雷射投影機集中在 RGB 三原色光，但是市售廣告皆說「雷射投影機顯示效果較佳」的宣傳下，讓我們不禁懷疑為什麼色彩較單調的雷射投影機顯示效果會比較優良呢？網路及相關的文章幾乎沒有對此說明，因此我們只好進一步的深入研究。

因此我們可以確定投影機是由三原色組成各式的色光，但我們更好奇的是，投影機有可能出現別色的色光光譜嗎？於是我們找尋相關的資料，以專業繪圖軟體製作出檢驗色票，並借用光譜儀器在暗房實驗，來對照不同色彩顯示的情況下，投影機光譜的變化。最後，我們逐一費時的量測換算，取得色度座標後，以「色溫圖」或是「色度座標圖」不一樣的光分析方式的立體說明，來完整分析投影機的色彩原理。

四、色票定義

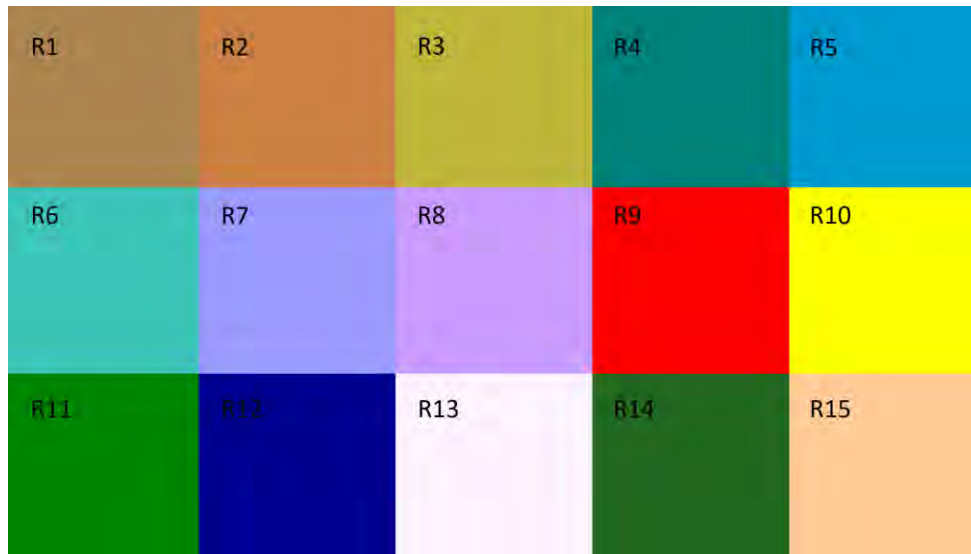


圖 4、R1-R15 色票

除了 RGB 三原色外，配合 R1-R15 的色票做為實驗底色，色票的顏色依據詳列如附件，比較特別的是，R13 是以白種人皮膚膚色來定義，R15 是黃種人膚色來定義。

五、暗房中量測投影機光譜

為了透過光譜儀準確測量投影機投射的差異，我們選擇在學校的天文教室進行實驗，天文教室為了防止光害可有效阻止額外光源的產生。我們在黑漆漆的教室裡進行實驗，盡可能地減少誤差的產生。實驗過程中，我們將光譜儀擺放在投影機前，對每一張色票進行測量，並隨時記錄測量結果。總體來說，我們不厭其煩地反覆操作相同的動作，經過長時間的實驗與紀錄，才得以發現不同投影機之間的差別。

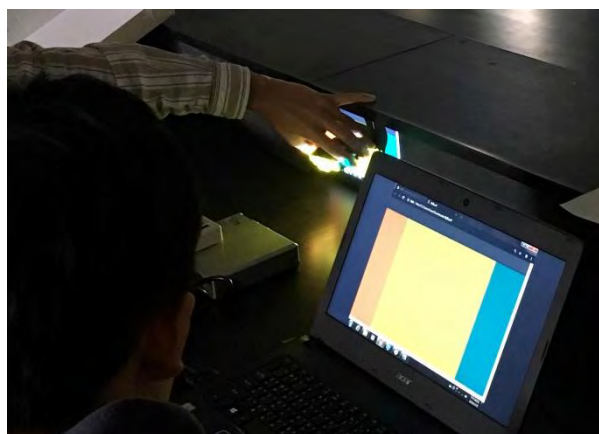


圖 5、實驗示意圖(有打光拍照)

六、VGA 線拔除針腳投影實驗

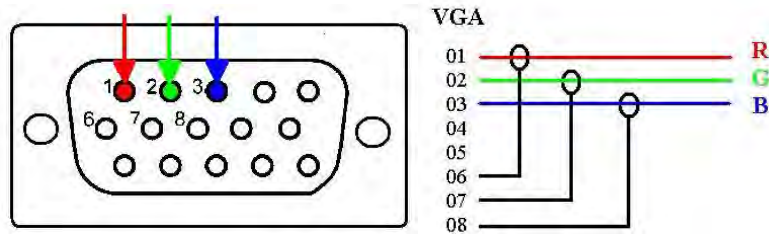


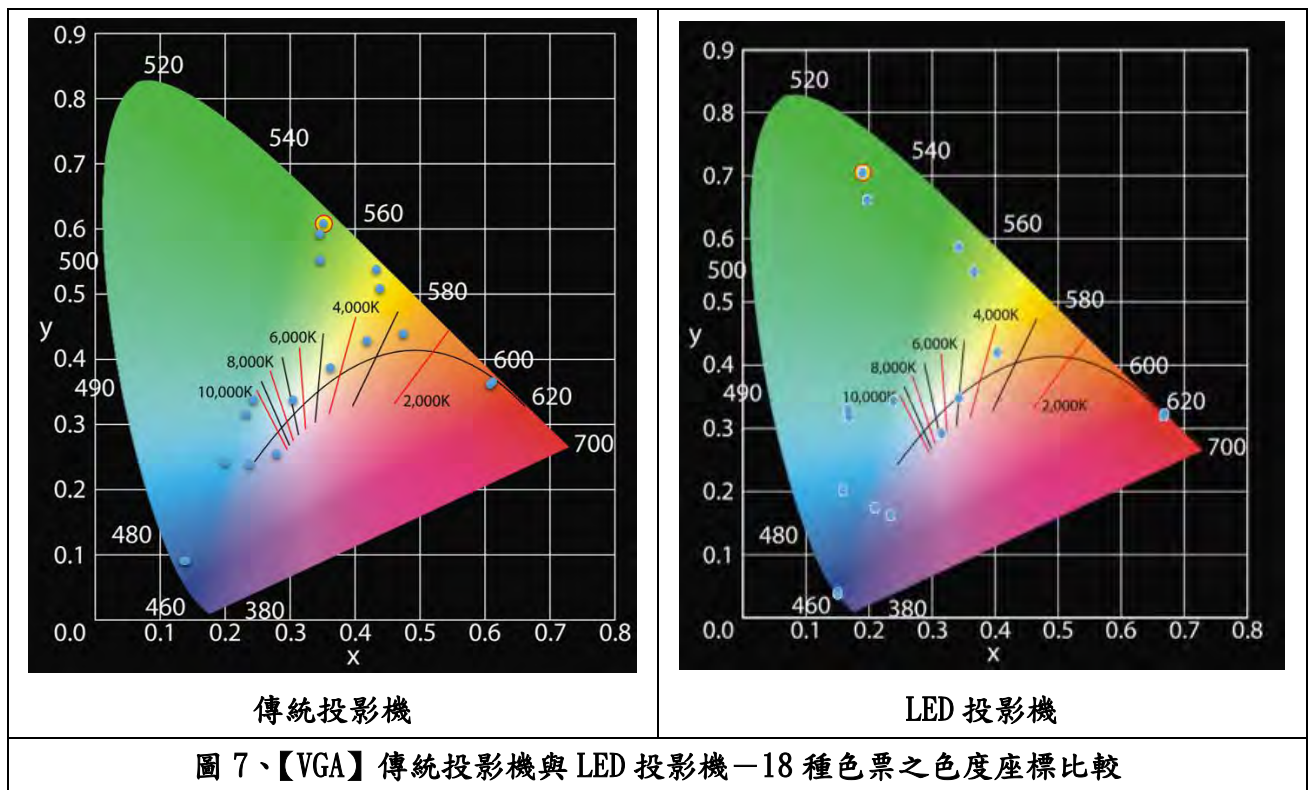
圖 6、RGB 線色彩關鍵接頭

進行投影機實驗的過程中，我們發現 VGA 線上那密密麻麻的 15 個端子，這讓我們非常好奇，上網查了一下發現，原來每個端子都有專屬的功能，像是 1、2、3 號端子分別就負責傳送紅色、綠色、藍色，為了確認每個端子的功能是否真如網路上的資料所說，決定分別剪掉 VGA 線的 1、2、3 號端子，並用一樣的實驗方法測量其光譜的變化。(註：Red 線接 VGA 的 1,6(6 是地線)，Green 線接 VGA 的 2,7(7 是地線)，Blue 線接 VGA 的 3,8(8 是地線))

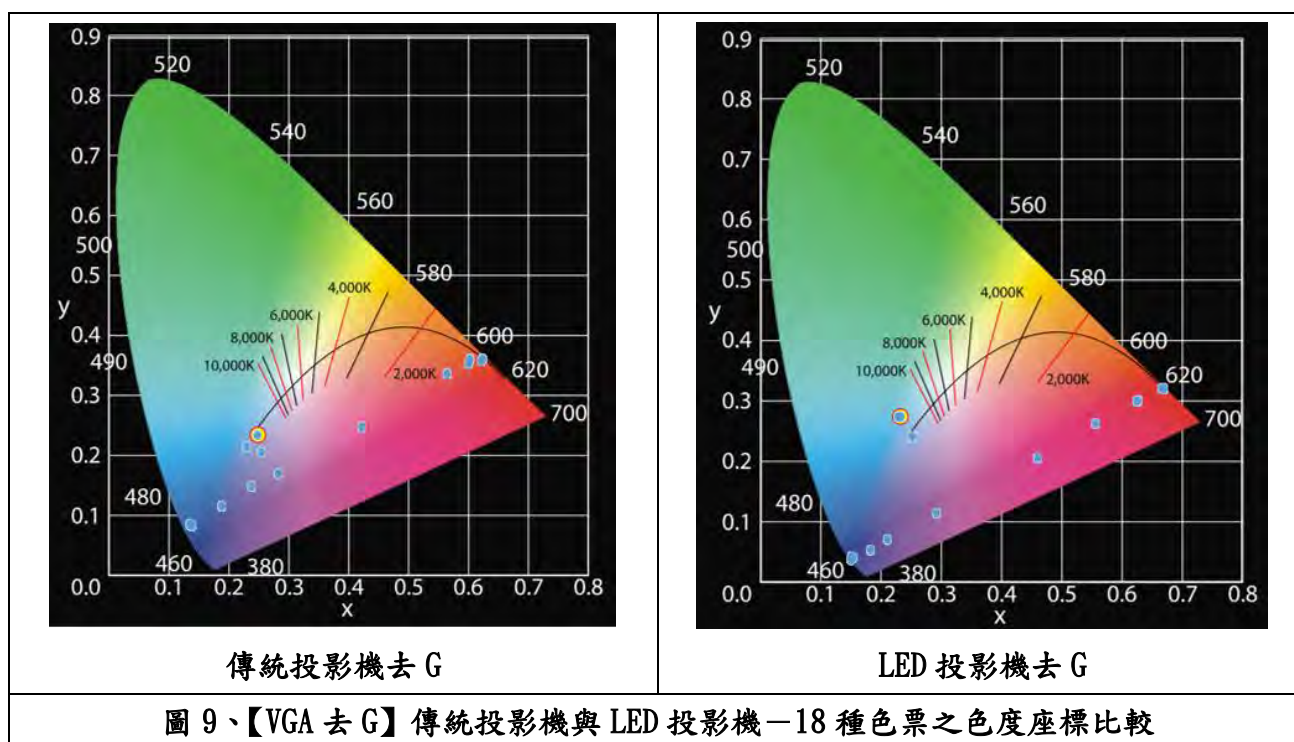
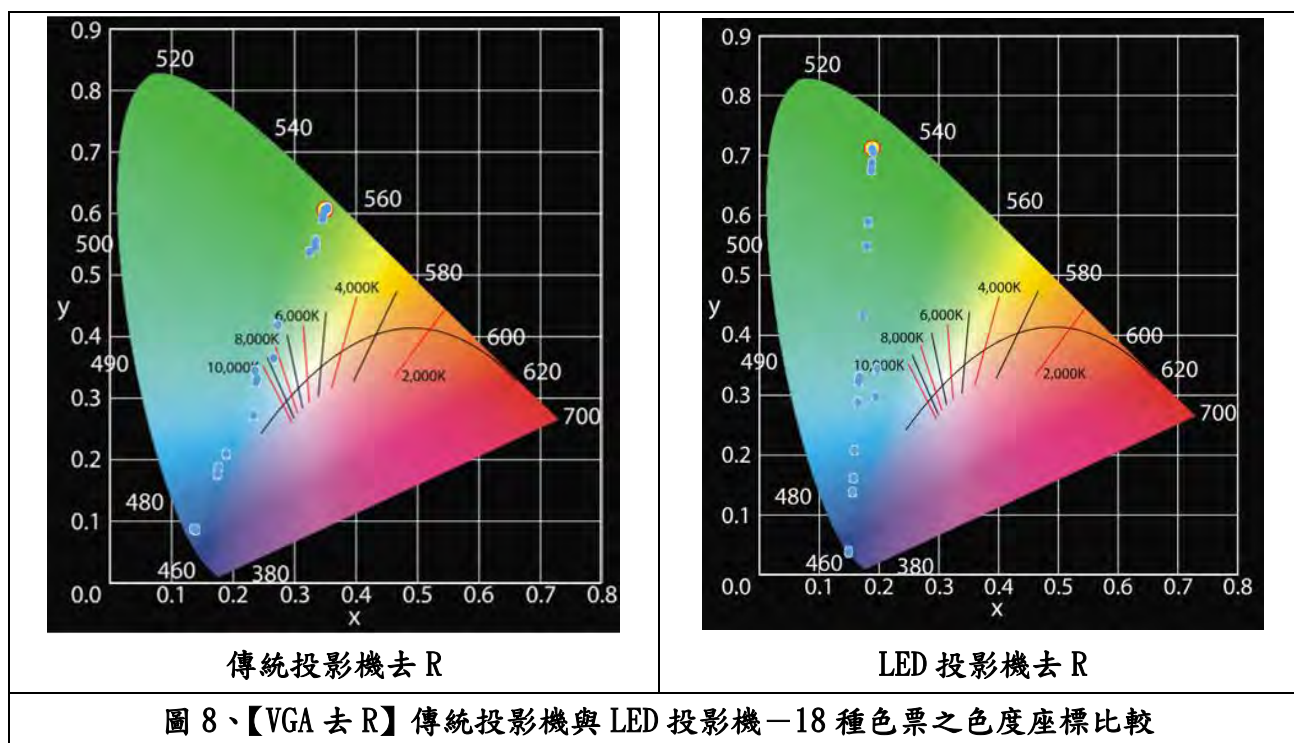
實驗結果

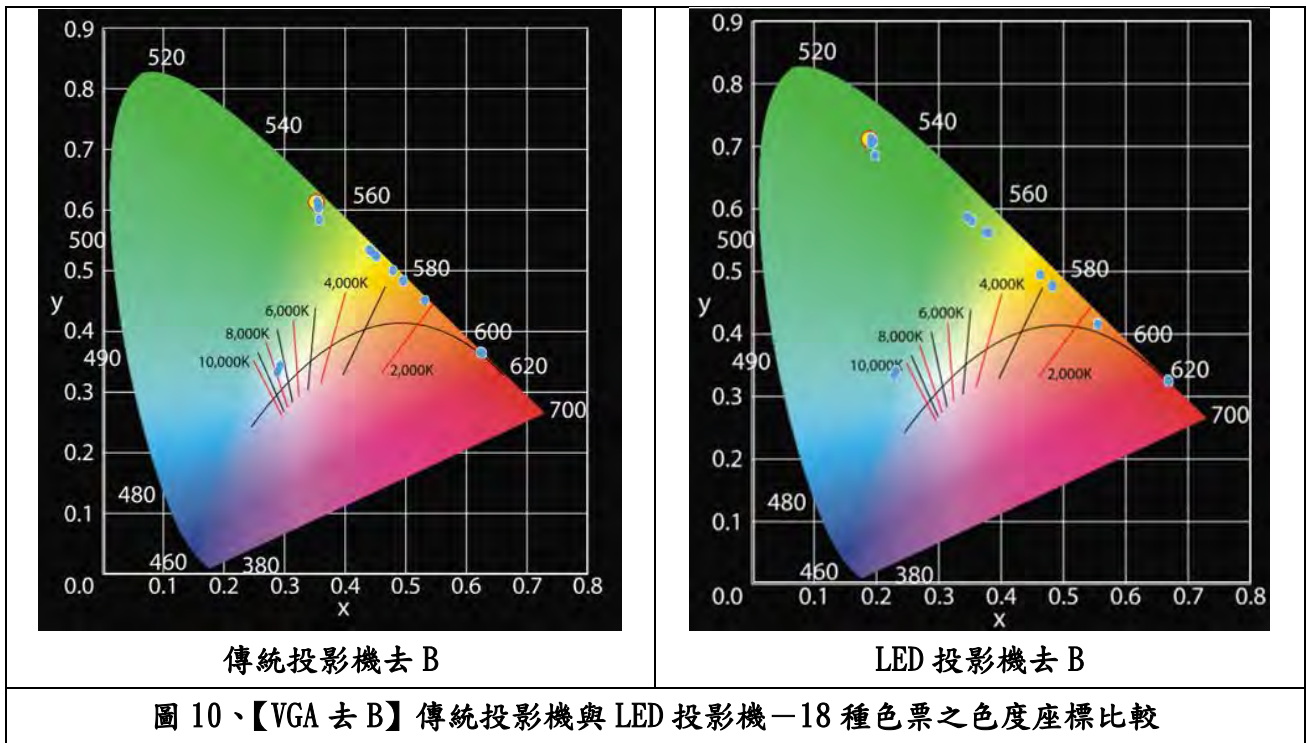
一、傳統投影機與 LED 投影機

我們所有的實驗數據以純綠色為背景色溫圖(紅線黃底之圓點)，並整合 18 組色票之光譜色度數據，以繪圖軟體配合 EXCEL 繪製座標後合成在一起，以利說明與討論。

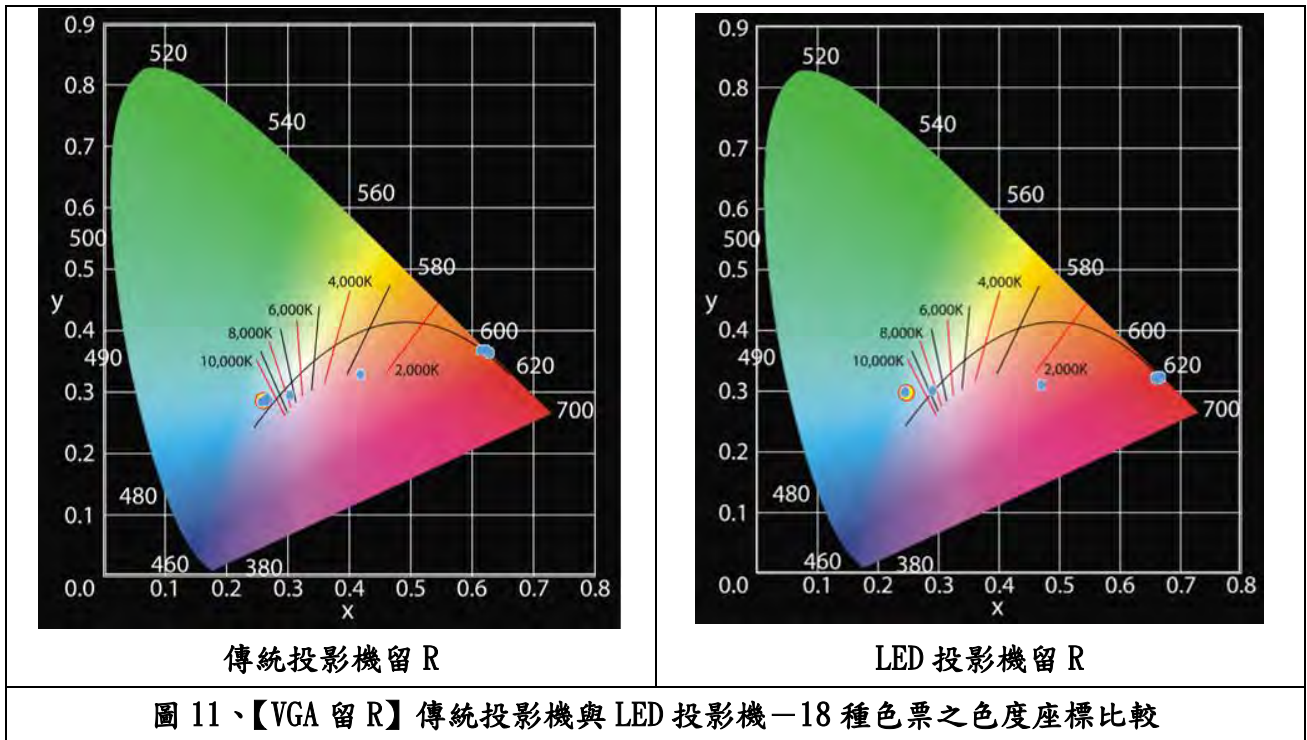


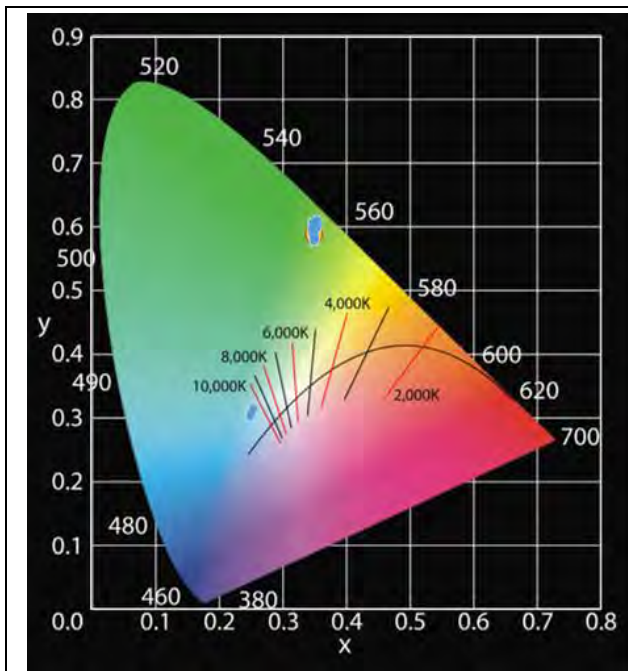
由上兩張圖可以發現，兩種投影機在 CIE 圖上呈現的色度座標範圍明顯不同，我們可以透過將 R、G、B 三色票的色度座標連線，來對比所形成的三角形區域，LED 投影機的三角形區域明顯大於傳統投影機，而在綠色顯示上，LED 投影機所投射光的色純度也相對傳統投影機來得好，這點可以由兩投影機綠色色票的主波長與色度座標得知。



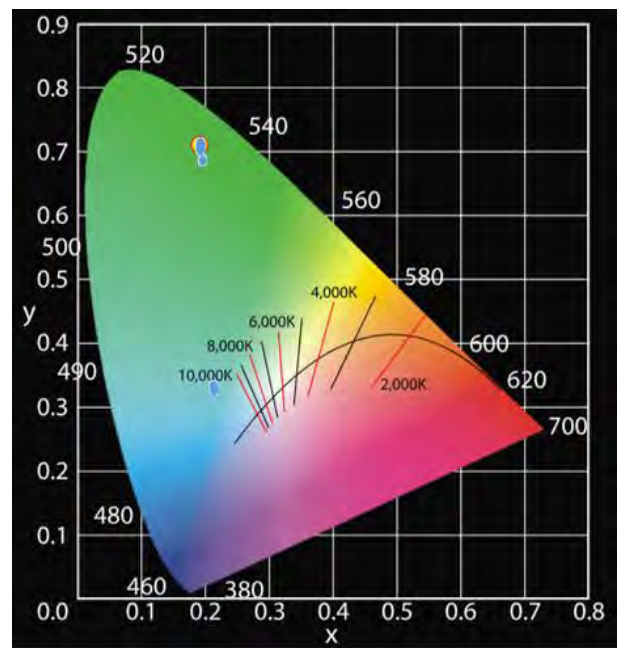


另外，我們可以由以上三組圖發現，若把 VGA 線材去 R、去 G、去 B 之後，色度座標皆為 2 種單色光所混合而成的色彩，在色度座標中各色票所呈現的位置就會成為一直線。而沒有訊號的時候量測到的光點會偏離主線，原因是背景光源接近黑體輻射之背景白光。



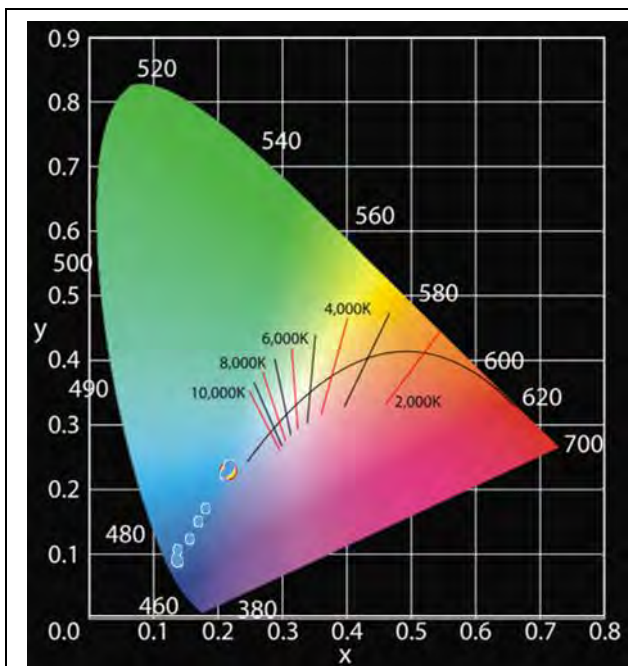


傳統投影機留 G

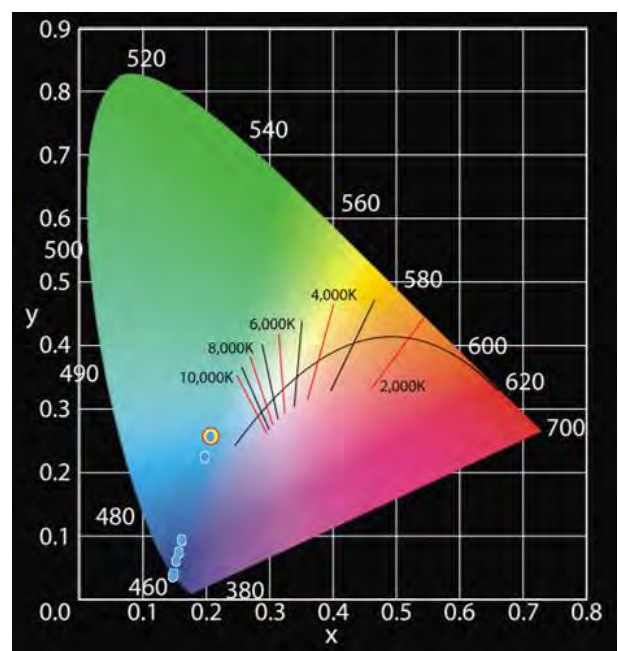


LED 投影機留 G

圖 12、【VGA 留 G】傳統投影機與 LED 投影機—18 種色票之色度座標比較



傳統投影機留 B



LED 投影機留 B

圖 13、【VGA 留 B】傳統投影機與 LED 投影機—18 種色票之色度座標比較

針對 VGA 線材只留單色的色溫圖來比較，理論上因為只剩單色光，應該 18 個點全結合在一個點上，但我們可以發現，所有的點分佈不全然往一個點集中，而是以原色光往背景白光直線延伸，因此可以確定，只剩單色光時強度就較弱了，若所使用之色票中該光度不足的情況下，實驗結果就像是與背影白光之混成色彩。

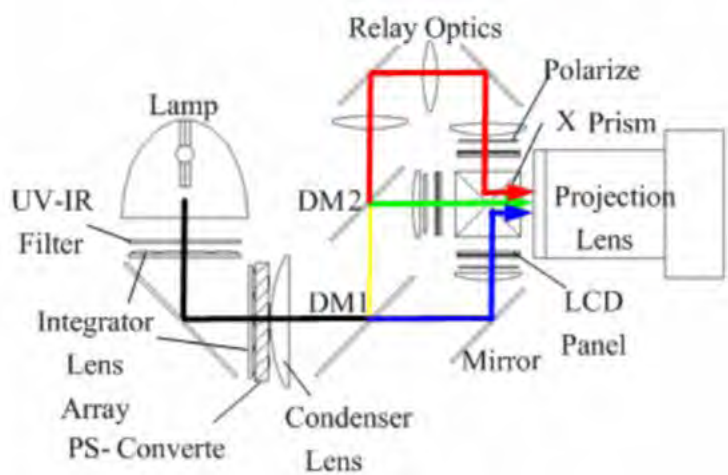


圖 14、投影機內部結構

我們在網路上，針對市售的投影機進行探討，發現主要使用分光稜鏡把白光分解為 R、B、G 三源，因此我們也以本校實驗室所購置之投影機分光稜鏡來打入白熾光後，發現真的可以分解成光的三原色，但紅色色彩的解析似乎與想像中的稍有落差。

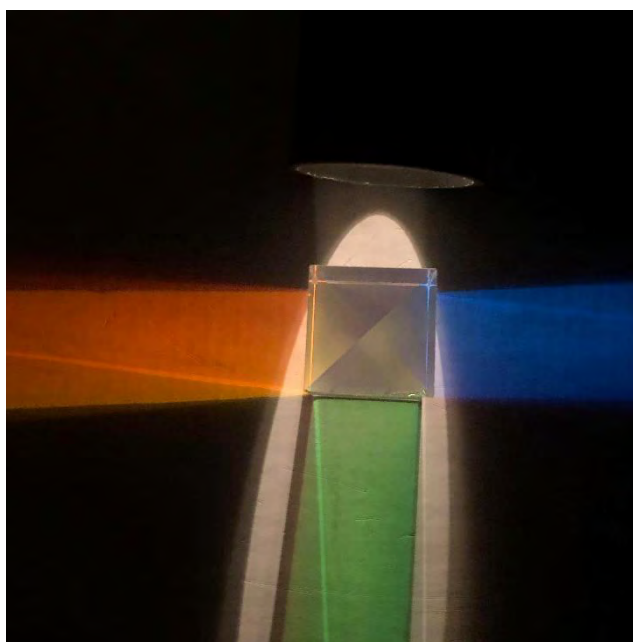


圖 15、以白熾光投射在分光稜鏡

將白熾光照在投影機的分光稜鏡上，可以清楚發現三原色的色光。但是若用高強度的 LED 手電筒照分光稜鏡後發現，在高強度光照下還是會漏光。我們由此推測，雷射投影機的原理應該非稜鏡分光，於是我們探究相關文章與實驗後，接下來有新奇的發現。

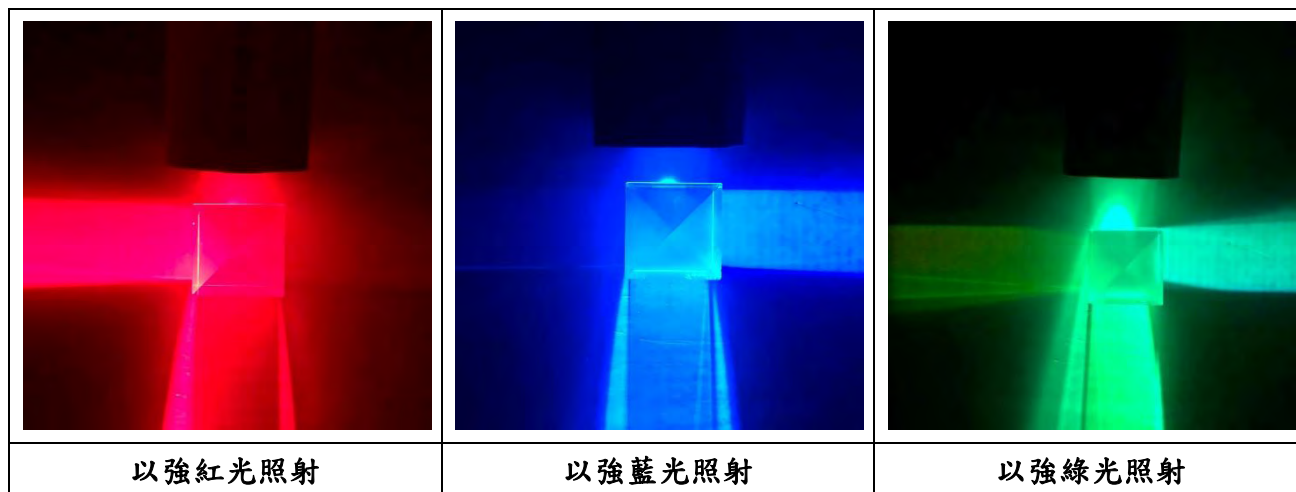


圖 16、以強原色光照射分光稜鏡

二、雷射投影機探究

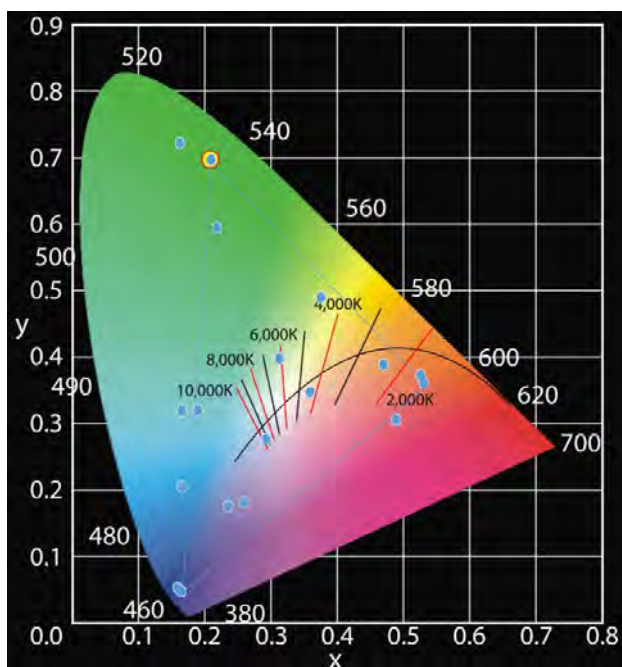
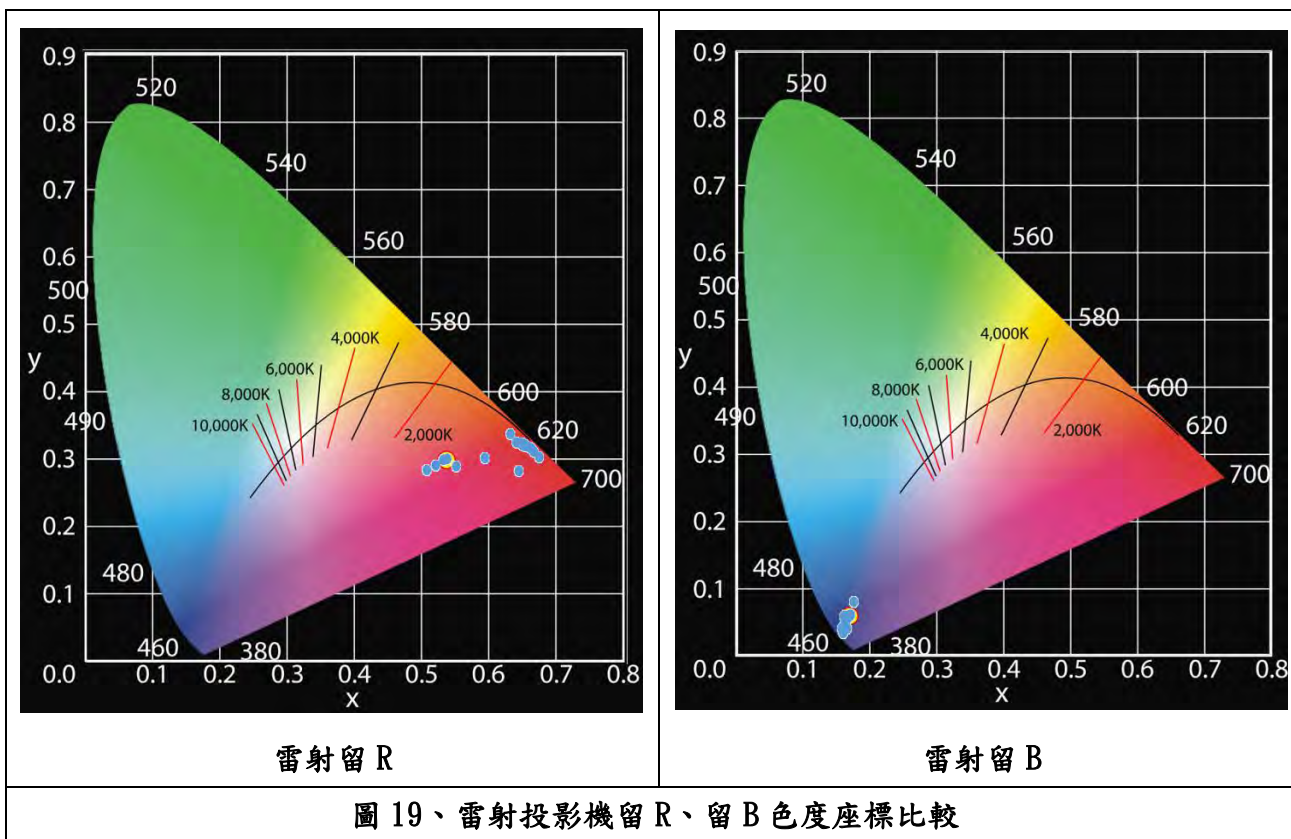
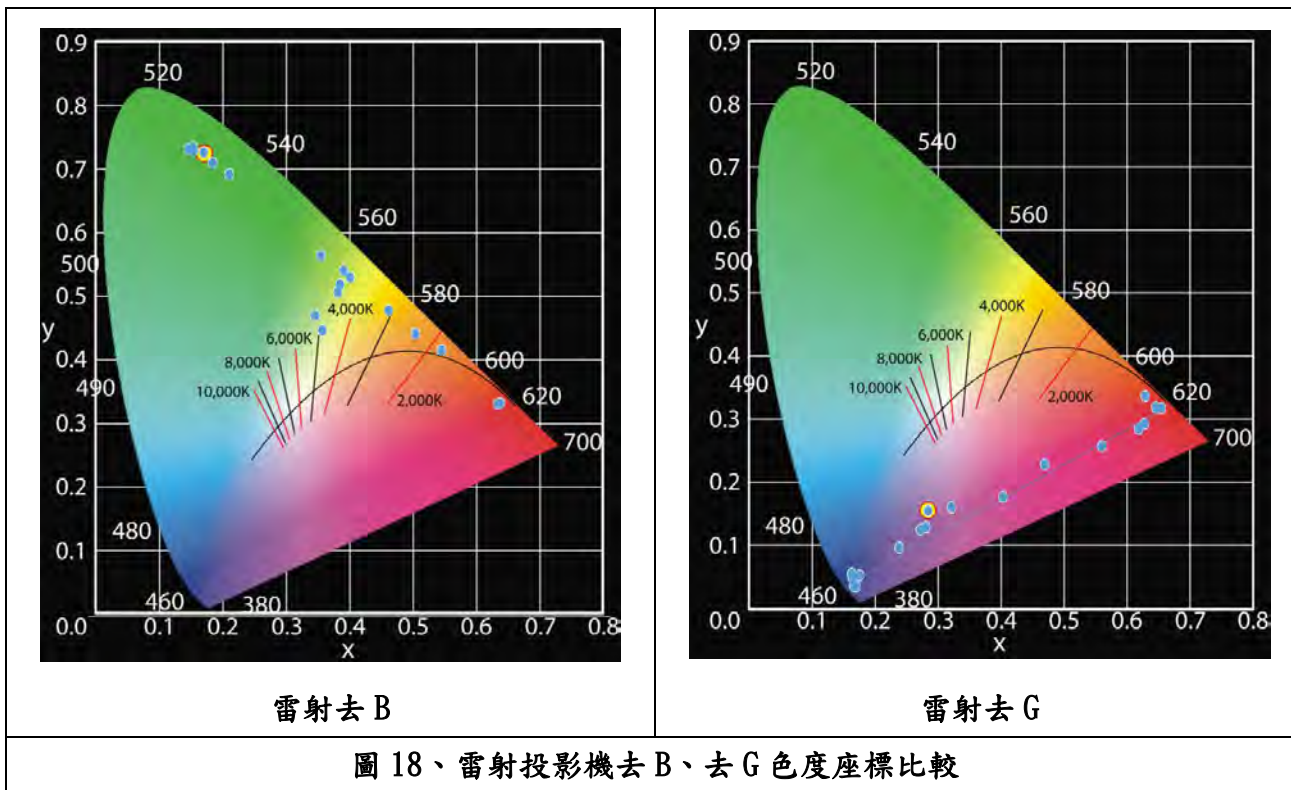
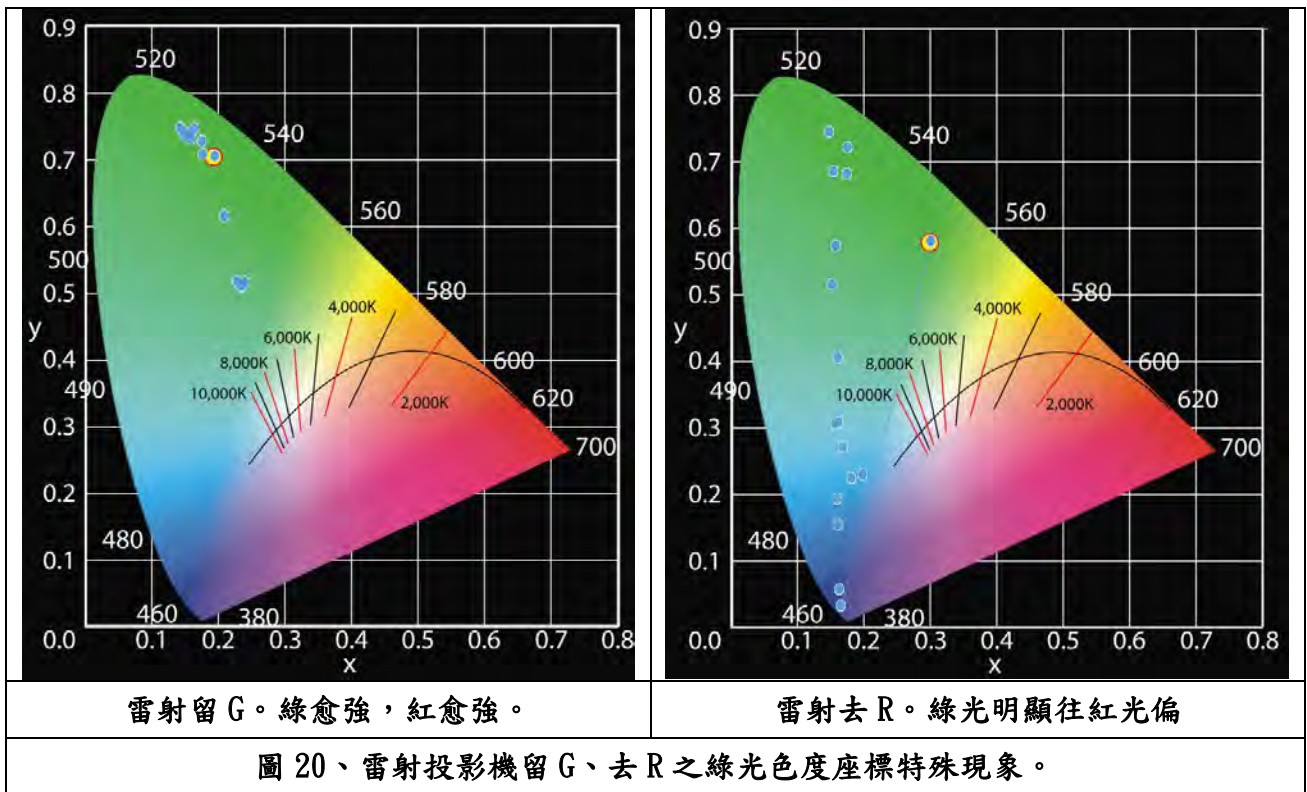


圖 17、雷射投影機 18 色票合成色溫圖





在傳統投影機與 LED 投影機中，純綠色票的色度座標的確最純，其餘的色度座標也座落在綠色與中央白點區域之間。然而在雷射投影機實驗，我們卻觀察到了非常有趣的結果：純綠色票的色度座標竟然非最純，而其他色票的色度座標顯得「更綠」，與傳統投影機及 LED 投影機的結果相反，反而純綠光色票最靠近紅光區域，我們推論：綠光是紅光變頻後的結果。由實驗數據來看，雷射投影機的綠光確實與紅光有高度相關性

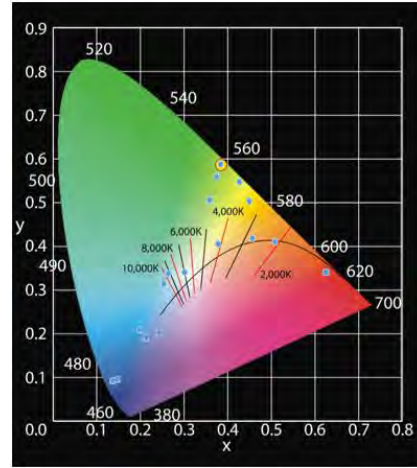
三、不同壽命下的傳統投影機燈泡比較

我們繼續針對同一型號，不同壽命的投影機(設備會顯示燈泡所剩下之壽命百分比)，進行對照實驗，我們找到了三台分別為壽命剩下 71%、53%、34%的機型，可以發現(如圖)，當壽命愈小的燈泡在光的色溫分佈中，會偏向藍光，表示除了藍光以外，綠光與紅光會隨著燈泡壽命衰減，或是說藍光比較不容易有強度上的衰減，LED 燈也有類似的現象，參考資料(李絕菲，2012)亦有提到相同的現象。

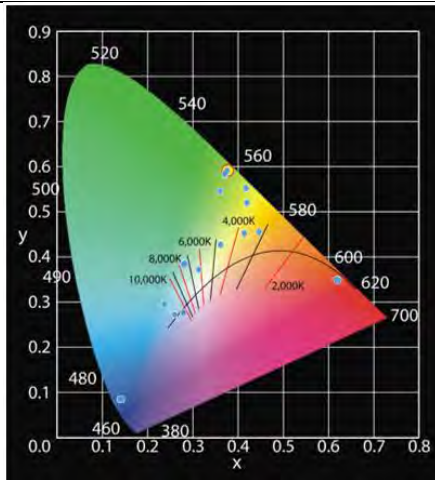
另外，我們也用另一品牌的兩台同型號同壽命(剩 4%)投影機進行量測，發現顯色區域一致，也交叉驗證了我們的發現。



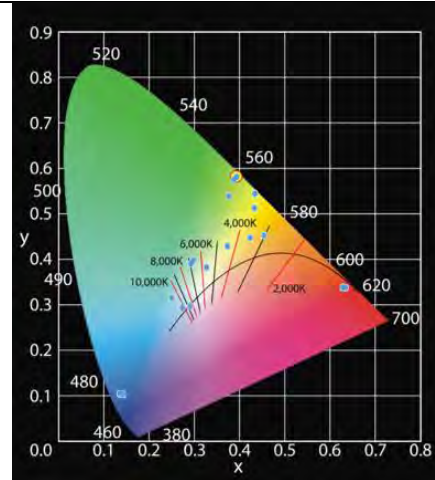
燈泡壽命剩 71%、53%、34% 投影機



燈泡壽命剩 34%



燈泡壽命剩 53%

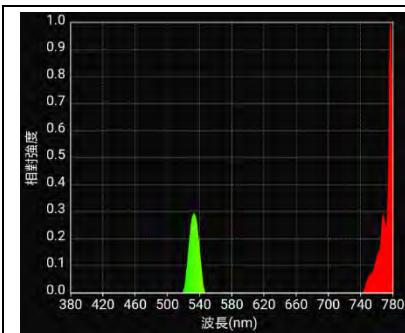


燈泡壽命剩 71%

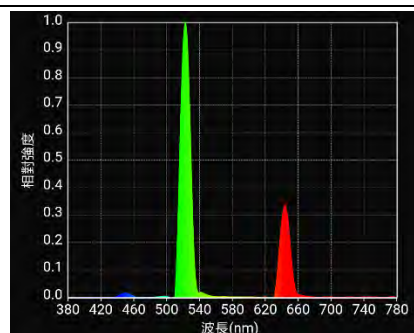
圖 21、3 種燈泡壽命投影機

討論

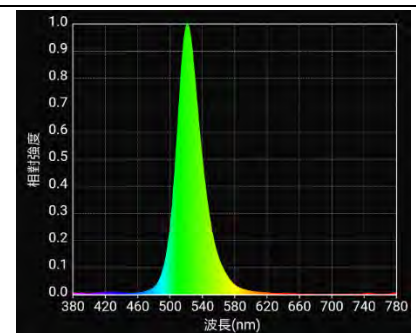
一、LED 與雷射筆的綠光特性探討



(1) 綠光雷射筆光譜圖



(2) 雷射投影機留 G



(3) 綠 LED 綠光光譜

圖 22、綠光雷射、雷射投影機及 LED 綠光燈泡光譜圖對照

紅光與藍光都可由二極體雷射直接發出，而綠光較不一樣，是由波長 808nm 的二極體雷射激發 Nd:YVO4 晶體，產生波長 1064nm 的光，再透過倍頻晶體 KTP 產生波長 532nm 的綠光，這也是為何測量綠光雷射的波長時，在特殊角度(感測器非垂直接收)時，會有 808nm 的波長出現。綠光屬於固態雷射，體積也較紅、藍光雷射筆來得龐大，才會在我們的實驗中，量測綠光雷射(532nm)波長時，在特定角度會出現 808nm 的光(參考資料二)

雷射光源有許多的優點，然而同時也存在一些問題：首先，直到現在還是沒有合適的綠色雷射光源，現行的方法是採用紅色雷射光通過一個按照正弦波震盪的石英，藉此使頻率倍增，從而得到波長大約為 540nm 的綠色雷射光，因為這種方式需要較高的溫度，導致綠光無法穩定的輸出；其次，用以產生綠光的模塊體積大、價格高，連帶提高了雷射光源的成本，造成售價居高不下的問題。(參考資料三)

二、電腦螢幕與投影機差異

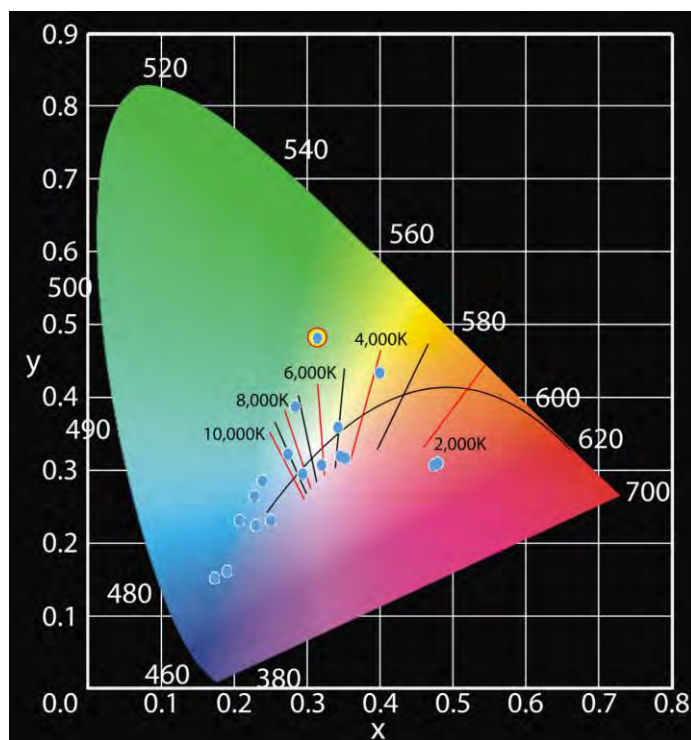
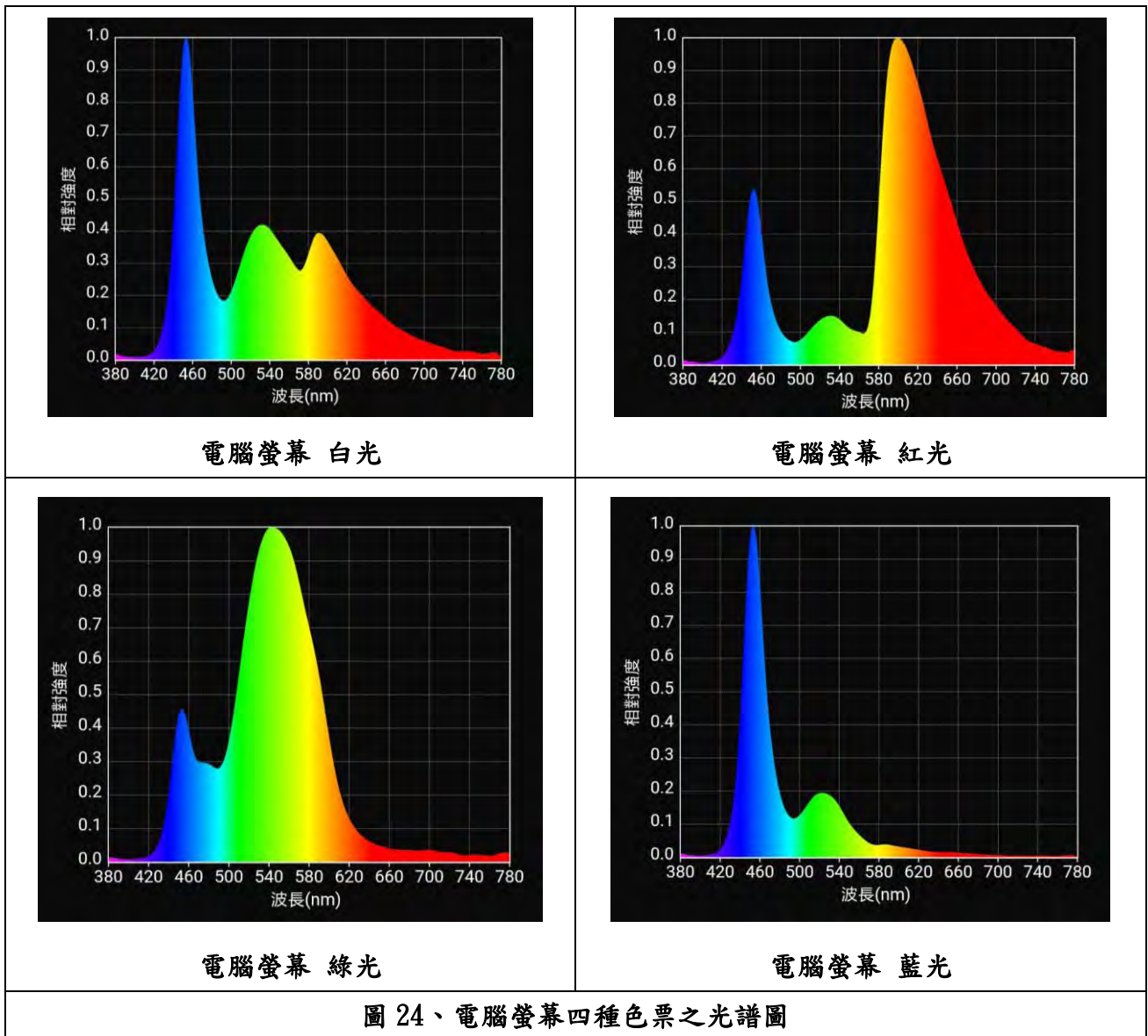


圖 23、電腦螢幕所有色票之色度分佈

出乎我們意料，我們以為顯示器的顏色會比投影機豐富，但由 LED 電腦螢幕顯示器的色度座標結果可以得知，RGB 所連線而成的三角型區塊比任何一款投影機都還要小。



長輩常說長時間用電腦很傷眼睛，因為電腦螢幕的藍光很強，於是我們便想到，既然手上有光譜儀，不如來測看看螢幕藍光。我們發現電腦螢幕不論發出何種光，都有一個明顯的藍光峰值，證明長輩的說法並不假。因為藍光頻率高，的確該避免長時間使用電腦，才較不傷害眼睛。

另外 LED 投影機與雷射投影機的光譜圖，則可以明顯看出藍光波長的相對強度不會特別突出。

三、演色性(Color rendering)的探討

光源光譜越接近黑體輻射光譜，被照物體就越能顯現它在太陽光下本來的色澤（因為太陽光譜很接近黑體輻射光譜），這樣的光源就比較「逼真」，其逼真程度以演色指數（CRI）來表示，演色性越高，光源越逼真。

平均演色性指數為物件在某光源與太陽光照射下顯示顏色之相對差異。通常以太陽光譜(接近黑體輻射)下為演色性(演色指數)Ra100。以下我們針對傳統投影機、LED 投影機、雷射投影機及螢幕顯示器的光譜來綜合比較。

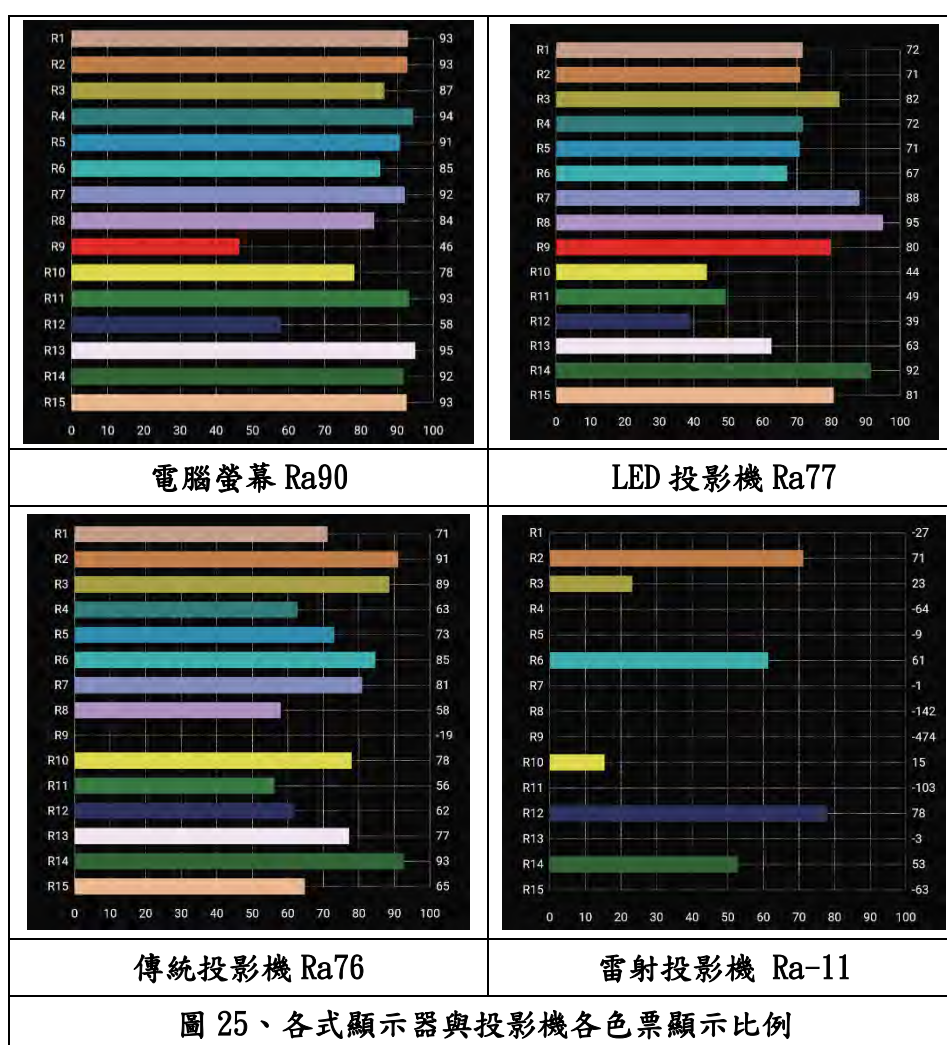
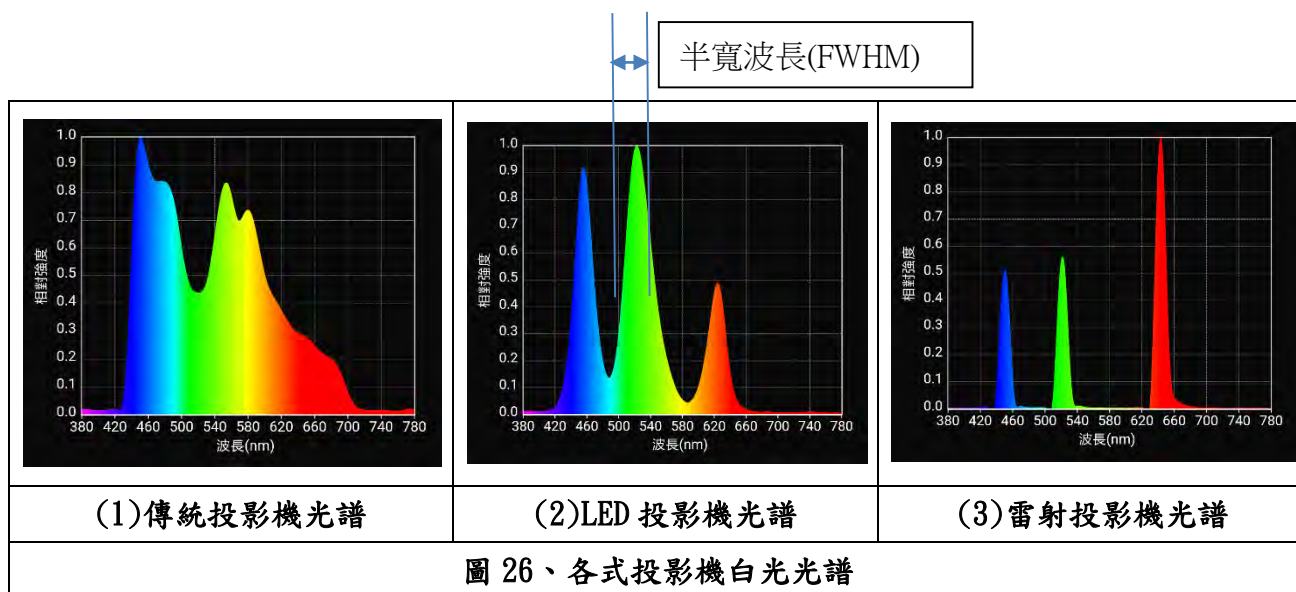


圖 25、各式顯示器與投影機各色票顯示比例

由上圖可知，雷射投影機有多數色票顯示的相對強度為-11，因此，雷射投影機雖然有很好的顯色效果，但若拿來做為光源照明時，演色性會是最差的。



綜合我們實驗的光譜圖來看，傳統投影機與 LED 投影機皆有類似黑體輻射形狀的分佈，而雷射投影機則只有 3 個明顯強度的色光，因此以演色性的定義而言(太陽照明後的效果定為 Ra100)來對照，就無法還原太陽底下物體的色澤。另外由半寬波長(FWHM)來比較，也可以發現：傳統投影機 > LED 投影機 > 雷射投影機。

結論

- 一、投影機的顯色性可由三原色的色度座標連線所形成的三角形區域比較，雷射投影機與 LED 投影機的顯色性最好，其次是傳統投影機，最差的是電腦螢幕。
- 二、若將 VGA 三原色傳輸端子之一剪除，色度座標結果即會是一直線，若只保留 VGA 三原色傳輸端子之一，色度座標結果則會是原色光往背景白光延伸，顯示投影機是用色光疊合的原理顯示色彩。
- 三、雷射投影機的綠光是由紅光變頻而來，與其他類型投影機不同。並由雷射筆實驗重複驗證市售綠光雷射主要是由紅光變頻而成。
- 四、電腦螢幕的藍光峰值明顯突出，顯現藍光強度較強，但是演色性 Ra 最好。
- 五、投影機的演色性由演色指數 (CRI) 表示，LED 投影機與傳統投影機差異不大，最差的則是雷射投影機。由於光源光譜越接近黑體輻射的話演色性越好，而電腦螢幕、傳統投影機與 LED 投影機的光譜較接近黑體輻射光譜，因此演色性較好；然而雷射投影機只有三個色光，且半寬波長極窄，所以雷射投影機的演色性最差。
- 六、同型號不同壽命的投影機，當燈泡壽命越短，其色度座標在色溫圖的分佈中，會偏向藍光。

參考資料

- 一、Suchit Rout, Global Strategic Marketing-Operator Experience. Power efficiency: the real difference between LED and Laser projection. April 5, 2017.
- 二、什麼？雷射筆差很大！。中華民國第 58 屆科學展覽作品
- 三、鳳凰網科技。RGB 分色是必須 投影机为什么需要色轮？。2018 年 6 月
- 四、激光显示在家庭影院的应用前景
http://www.itavcn.com/news/201209/20120926/28723_4.shtml
- 五、最深入淺出的技術貼：雷射光機的演進。2017/2。來源
<https://kknews.cc/tech/y8ayr3b.html>
- 六、Lighting-based applications for general and engineered solutions。 <https://eyelighting.com/>
- 七、胡國瑞等著。顯示色彩工程學 第二版。2011/3 全華
- 八、林清富。色彩原理。台大電機系科普系列文章。2013/7
- 九、李艳菲，张方辉，张摇静。大功率 LED 的电流老化特性分析。发光学报，2012，33(11)

附錄一、色票各種顏色依據

	R1 Light greyish red	淡灰紅
	R2 Dark greyish yellow	暗灰黃
	R3 Strong yellow green	飽和黃綠
	R4 Moderate yellowish green	中等黃綠
	R5 Light bluish green	淡藍綠
	R6 Light blue	淡藍
	R7 Light violet	淡紫藍
	R8 Light reddish purple	淡紅紫
	R9 Strong red	飽和紅
	R10 Strong yellow	飽和黃
	R11 Strong green	飽和綠
	R12 Strong blue	飽和藍
	R13 Light yellowish pink	白種人膚色
	R14 Moderate olive green	樹葉綠
	R15 Asian skin color	黃種人膚色

附錄二、各投影機光譜、色溫及色度座標原始數據

附表 1、雷射投影機

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4688	0.5253	0.3114	0.1644	0.1646	0.1884	0.2339	0.2574	0.4884	0.3741	0.1616	0.164	0.2917	0.2171	0.3582	0.1584	0.2085	0.53
CIE_y	0.3889	0.3729	0.3986	0.3201	0.2052	0.3211	0.1763	0.1816	0.3064	0.4905	0.7217	0.0473	0.2774	0.5952	0.3488	0.0537	0.6973	0.3625
相關色溫(K)	2418	1764	6211	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	1619	4674	-9999	-9999	9349	-9999	4500	-9999	-9999	1670

附表 2、雷射投影機-去 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.5051	0.5468	0.3914	0.1545	0.1471	0.1854	0.4017	0.3856	0.6381	0.356	0.153	0.3464	0.382	0.2102	0.4627	0.3574	0.1708	0.6347
CIE_y	0.4391	0.4132	0.5396	0.7283	0.7305	0.7079	0.5285	0.5172	0.33	0.5626	0.7327	0.4677	0.5058	0.6908	0.4769	0.4448	0.7247	0.3295
相關色溫(K)	2381	1846	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	5203	4571	-9999	3128	4907	-9999	-9999

附表 3、雷射投影機-去 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.5601	0.6185	0.6271	0.169	0.1635	0.1752	0.2379	0.2801	0.6542	0.6449	0.2716	0.1653	0.3206	0.4029	0.4686	0.1626	0.2837	0.6285
CIE_y	0.2586	0.2849	0.2939	0.0351	0.0497	0.0539	0.0973	0.1303	0.3182	0.3197	0.1259	0.0377	0.1609	0.1779	0.2292	0.0563	0.1554	0.3371
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 4、雷射投影機-去 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.1501	0.1558	0.1524	0.1554	0.1583	0.1598	0.1589	0.1588	0.179	0.1738	0.1452	0.1638	0.1672	0.1729	0.1592	0.1614	0.2994	0.1957
CIE_y	0.5146	0.5722	0.6839	0.3058	0.1933	0.3075	0.1541	0.1549	0.2245	0.72	0.7425	0.0333	0.2706	0.6803	0.4043	0.0579	0.5787	0.2298
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 5、雷射投影機-留 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.1573	0.158	0.1594	0.1637	0.1615	0.1645	0.175	0.1598	0.1692	0.1705	0.1694	0.1645	0.1605	0.1696	0.1614	0.1609	0.1695	0.1682
CIE_y	0.0401	0.0356	0.0334	0.0411	0.0523	0.0528	0.079	0.0572	0.0588	0.0608	0.0591	0.0399	0.057	0.0605	0.04	0.0588	0.0595	0.0573
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 6、雷射投影機-留 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.144	0.155	0.1476	0.1501	0.1549	0.141	0.1443	0.1472	0.2327	0.1736	0.1477	0.2373	0.1745	0.1581	0.2262	0.1621	0.1926	0.2068
CIE_y	0.743	0.7389	0.7357	0.737	0.7314	0.7473	0.7413	0.7397	0.5094	0.7261	0.7348	0.5149	0.7073	0.731	0.5158	0.7449	0.7047	0.6143
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 7、雷射投影機-留 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.6605	0.6466	0.6542	0.5211	0.5322	0.6739	0.6668	0.6629	0.6318	0.6495	0.5073	0.5931	0.6536	0.6441	0.6502	0.5506	0.5372	0.6403
CIE_y	0.3157	0.3228	0.3191	0.2891	0.2974	0.3016	0.3098	0.3142	0.3353	0.3222	0.2823	0.3002	0.3183	0.2815	0.3196	0.2879	0.2987	0.3243
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 8、LED 投影機

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4034	0.3149	0.3667	0.1671	0.1593	0.1684	0.2091	0.2346	0.6691	0.3424	0.1507	0.2386	0.1973	0.3424	0.1497	0.1901	0.6682	0.53
CIE_y	0.4205	0.292	0.5483	0.3304	0.2017	0.3194	0.1749	0.1629	0.3235	0.5867	0.0401	0.3437	0.6626	0.3478	0.0379	0.7052	0.3212	0.3625
相關色溫(K)	3762	6730	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	11067	-9999	5094	-9999	-9999	-9999	1670

附表 9、LED 投影機-去 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R	
CIE_x	0.4807	0.5539	0.3777	0.1888	0.1914	0.1922	0.3735	0.4812	0.6691	0.3511	0.189	0.2286	0.3436	0.1945	0.4606	0.2256	0.1887	0.6676	
CIE_y	0.4747	0.4143	0.5596	0.7033	0.707	0.7078	0.5606	0.4756	0.3222	0.5788	0.7044	0.3392	0.5856	0.6845	0.4932	0.3338	0.7115	0.3233	
相關色溫(K)	2878	1802	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	2877	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	3256	-9999	-9999	-9999

附表 10、LED 投影機-去 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R	
CIE_x	0.5569	0.6274	0.6253	0.15	0.1494	0.1535	0.1813	0.2092	0.6703	0.6704	0.227	0.1498	0.2911	0.251	0.4603	0.1492	0.2322	0.6671	
CIE_y	0.263	0.3017	0.3005	0.043	0.0378	0.041	0.0536	0.0708	0.3223	0.3211	0.2747	0.0417	0.1148	0.2416	0.2068	0.0365	0.274	0.3228	
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	25733	-9999	-9999	40550	-9999	-9999	-9999	23402	-9999

附表 11、LED 投影機-去 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R	
CIE_x	0.1798	0.182	0.188	0.1664	0.1596	0.1662	0.1564	0.1553	0.1947	0.1896	0.19	0.1494	0.1646	0.1866	0.1721	0.1488	0.1885	0.1974	
CIE_y	0.5494	0.5901	0.6879	0.3305	0.2074	0.3226	0.1616	0.1374	0.2979	0.7083	0.7076	0.0393	0.2884	0.6755	0.4317	0.0373	0.7118	0.3435	
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 12、LED 投影機-留 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R	
CIE_x	0.1538	0.1583	0.1624	0.1487	0.1495	0.1497	0.1483	0.1482	0.2072	0.2068	0.2071	0.149	0.1492	0.1987	0.1502	0.1495	0.2069	0.2075	
CIE_y	0.061	0.0759	0.0938	0.0415	0.038	0.0393	0.0378	0.0368	0.2568	0.2573	0.257	0.0405	0.038	0.2259	0.0405	0.0385	0.2573	0.2577	
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 13、LED 投影機-留 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.1915	0.1912	0.1922	0.1918	0.1916	0.1912	0.1915	0.1922	0.2131	0.191	0.1911	0.213	0.1914	0.1947	0.1913	0.2132	0.1909	0.2121
CIE_y	0.7032	0.7035	0.7129	0.7038	0.7112	0.714	0.7098	0.7097	0.3267	0.7073	0.7074	0.3272	0.7131	0.6872	0.7143	0.3274	0.7106	0.3331
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 14、LED 投影機-留 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.6599	0.6644	0.6677	0.2461	0.2458	0.4719	0.664	0.6697	0.6716	0.6689	0.2458	0.2459	0.6713	0.2917	0.6692	0.2462	0.2467	0.6707
CIE_y	0.3212	0.322	0.3199	0.297	0.2968	0.3091	0.3187	0.322	0.3208	0.321	0.2965	0.297	0.3209	0.2993	0.3211	0.2972	0.2973	0.3213
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	13867	13956	1769	-9999	-9999	-9999	-9999	13991	13907	-9999	8444	-9999	13839	13749	-9999

附表 15、傳統投影機

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4186	0.475	0.4389	0.233	0.1998	0.2435	0.2379	0.2791	0.6099	0.4332	0.3472	0.1404	0.3045	0.3461	0.3622	0.1361	0.3519	0.6135
CIE_y	0.4268	0.4379	0.5077	0.3154	0.2409	0.3366	0.2369	0.2536	0.3604	0.5368	0.5914	0.0887	0.3358	0.5522	0.3858	0.0888	0.6079	0.3639
相關色溫(K)	3503	2702	3647	13743	-9999	11016	-9999	13944	-9999	3865	-9999	-9999	6892	-9999	4575	-9999	-9999	-9999

附表 16、傳統投影機-去 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4951	0.5306	0.4512	0.354	0.3532	0.3542	0.4485	0.4945	0.623	0.4385	0.3534	0.2901	0.4424	0.3555	0.4779	0.2855	0.3522	0.6259
CIE_y	0.4817	0.4503	0.5226	0.6018	0.6076	0.6091	0.524	0.4834	0.3652	0.5344	0.6037	0.3434	0.5318	0.5825	0.4992	0.3322	0.6128	0.3633
相關色溫(K)	2750	2194	3545	-9999	-9999	-9999	3590	2767	-9999	3778	-9999	7582	3712	-9999	3064	8056	-9999	-9999

附表 17、傳統投影機-去 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.564	0.6008	0.6023	0.1401	0.1354	0.1403	0.1881	0.2381	0.6234	0.6233	0.2302	0.1381	0.2826	0.2547	0.4223	0.1352	0.2483	0.6216
CIE_y	0.337	0.3543	0.3615	0.0852	0.0849	0.0844	0.1166	0.1489	0.3616	0.3616	0.2161	0.0834	0.1705	0.2069	0.2487	0.0868	0.2343	0.3598
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	94702	-9999

附表 18、傳統投影機-去 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.325	0.2669	0.3495	0.1362	0.3352	0.3476	0.2376	0.1892	0.2396	0.175	0.1772	0.2341	0.3467	0.1397	0.2365	0.3348	0.2736	0.3539
CIE_y	0.5382	0.3661	0.6066	0.0892	0.5562	0.5986	0.3259	0.211	0.3325	0.1776	0.1884	0.2735	0.5913	0.0877	0.3456	0.5467	0.4186	0.6089
相關色溫(K)	-9999	8445	-9999	-9999	-9999	-9999	12257	-9999	11603	-9999	-9999	22790	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 19、傳統投影機-留 B

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.1554	0.1697	0.1805	0.1386	0.1346	0.1354	0.1341	0.1362	0.215	0.2158	0.2165	0.1374	0.1339	0.2091	0.1364	0.1346	0.2158	0.22
CIE_y	0.12	0.1476	0.1685	0.0868	0.0864	0.086	0.0894	0.1043	0.2328	0.232	0.2348	0.0859	0.0887	0.2215	0.0852	0.089	0.2287	0.2344
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

附表 20、傳統投影機-留 G

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.3546	0.3543	0.355	0.3479	0.3544	0.3548	0.3552	0.3549	0.2535	0.3503	0.3543	0.2543	0.3471	0.352	0.3475	0.2544	0.3484	0.2497
CIE_y	0.6028	0.6007	0.6089	0.6075	0.6076	0.611	0.6076	0.6054	0.3121	0.5806	0.6023	0.3147	0.5948	0.5845	0.5996	0.3146	0.5879	0.304
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	11498	-9999	-9999	11238	-9999	-9999	-9999	11243	-9999	12600

附表 21、傳統投影機-留 R

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.6167	0.6211	0.6213	0.2639	0.4158	0.2635	0.6117	0.6209	0.6269	0.6263	0.263	0.2545	0.6267	0.3008	0.6268	0.2626	0.2601	0.6261
CIE_y	0.3671	0.3667	0.366	0.2882	0.3274	0.2876	0.3679	0.3667	0.3627	0.3626	0.2857	0.2828	0.3625	0.2939	0.3628	0.2847	0.286	0.3627
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	12126	2655	12254	-9999	-9999	-9999	-9999	12510	14335	-9999	7823	-9999	12685	12937	-9999

附表 22、電腦螢幕

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.3199	0.3519	0.3422	0.2277	0.2077	0.239	0.2302	0.2499	0.4729	0.3991	0.284	0.1909	0.2942	0.2732	0.3453	0.1738	0.3137	0.4789
CIE_y	0.3074	0.3164	0.359	0.2646	0.2314	0.2856	0.2241	0.2315	0.3075	0.4348	0.3875	0.1615	0.2952	0.3223	0.3195	0.1519	0.4822	0.3097
相關色溫(K)	6241	4524	5133	34087	-9999	17185	-9999	-9999	1750	3940	7322	-9999	8362	9186	4852	-9999	-9999	1715

附表 23、雷射筆 RGB 與 LED 測試盒

檔案名稱	R	G	B	LED 測試 G	LED 測試 R	LED 測試 B	LED 測試 W
CIE_x	0.709	0.1765	0.2022	0.1753	0.6834	0.1747	0.2585
CIE_y	0.2872	0.7909	0.0935	0.7127	0.3067	0.0568	0.2501
相關色溫(K)	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	22808

附表 24、手電筒

檔案名稱	透過水管白熾	手電筒 B	手電筒 R	手電筒 G	面 3	面 2	面 1
CIE_x	0.4795	0.1765	0.663	0.2698	0.613	0.4372	0.2409
CIE_y	0.4121	0.2526	0.3224	0.514	0.3727	0.4841	0.3415
相關色溫(K)	2458	-9999	-9999	-9999	-9999	3545	10985

附表 25、傳統投影機 34%

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4576	0.5099	0.45	0.2536	0.1983	0.2632	0.2135	0.2425	0.6281	0.4277	0.3754	0.1476	0.3014	0.3588	0.3789	0.1365	0.385	0.6263
CIE_y	0.4181	0.4097	0.5027	0.3144	0.2082	0.3375	0.1918	0.203	0.3399	0.5471	0.5593	0.0963	0.3406	0.5059	0.405	0.0925	0.5861	0.34
相關色溫(K)	2791	2123	3459	11336	-9999	9418	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	7006	-9999	4224	-9999	-9999	-9999

附表 26、傳統投影機 53%

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.4148	0.4473	0.4209	0.2801	0.2373	0.2829	0.2608	0.2799	0.6188	0.4188	0.3715	0.1446	0.3134	0.3609	0.3622	0.1388	0.3769	0.6224
CIE_y	0.4525	0.4568	0.52	0.3837	0.2947	0.3861	0.2729	0.2781	0.3501	0.5526	0.5839	0.0863	0.3721	0.5461	0.4276	0.0857	0.5913	0.3492
相關色溫(K)	3740	3222	3975	7533	15793	7383	14660	10789	-9999	-9999	-9999	-9999	6235	-9999	4741	-9999	-9999	-9999

附表 27、傳統投影機 71%

檔案名稱	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	B	G	R
CIE_x	0.423	0.4539	0.432	0.291	0.2495	0.2971	0.2732	0.2906	0.6273	0.433	0.3864	0.1428	0.3262	0.3753	0.3726	0.1344	0.3927	0.6327
CIE_y	0.448	0.4527	0.5134	0.3907	0.3154	0.3974	0.2934	0.2976	0.339	0.5442	0.5752	0.1039	0.3833	0.5391	0.4286	0.1049	0.5822	0.338
相關色溫(K)	3564	3095	3777	7011	11712	6725	10548	8592	-9999	3898	-9999	-9999	5729	-9999	4495	-9999	-9999	-9999

附錄三、一般常見照明燈具所採用的色溫

1600K：日出和日落。1950-2250k：高壓鈉燈。1800K：燭光。2700K：鎢絲燈（日常家用燈泡）。3000K：鹵素燈，舞臺燈、照相攝影燈。4000-4600k：金屬鹵化物燈。5000K：NIKON 數位相機名稱表示日光 5000K，這是用於攝影、美術和其他目的專業燈箱的最常用標準。5200K：燦爛的正午陽光。5500K：一般的日光，電子閃光燈。6000K：略有陰雲的天氣。6500K：濃雲密佈的天氣。8000K：濃霧瀰漫的天氣。20000K：天空碧藍的天氣。取自 <http://www.fuji.com.tw/shownews.asp?RecordNo=1723>

【評語】 052410

本作品以光柵、分光稜鏡、雷射筆等器材，透過色票統一標準，使用光譜儀將結果數據化，比較不同類型顯示器（傳統投影機、LED 投影機、雷射及電腦螢幕等）的顯色效果差異。本件作品針對現有商品呈現其顯色現象之不同，探討色度演色性等一些量化方法有一定的教育意義。然而，在創意、學術與實用價值上，宜再加強。

摘要

本作品比較不同類型顯示器（傳統投影機、LED投影機、雷射投影機及電腦螢幕等）的顯色效果差異。最初使用光柵、分光稜鏡、雷射筆等實驗來確定投影機的原理，接著透過色票統一標準，使用光譜儀將結果數據化，再進一步將VGA線的三原色（紅綠藍，以下用RGB代表）傳輸端子剪除，共有六種組合（去R、去G、去B，留R、留B、留G），對比不同投影機之間的實驗結果，並配合其他顯示器實驗來驗證我們的構想。

實驗發現雷射投影機的綠光是由紅光變頻而來。此外，數據顯示雷射投影機的演色性，相對其他類型投影機來的低，對比後確認是光譜與太陽黑體輻射不同所導致。同時，我們還量測各種不同的顯示器，或是對照各種壽命之機器，試著分析出其中的物理結果。

研究動機

上課時物理老師使用投影機播放有趣的物理影片，但是除了物理影片以外，我更好奇的是投影機的原理是什麼，於是我找了相關的資料發現除了傳統投影機，更有雷射投影機這樣的商品。然而，就投影效果而言，雷射投影機比上一般傳統投影機的優勢在哪呢？網路上並沒有確切的數據，國內外網站也都沒有相關的實驗資料。正巧，學校近期也淘汰了一批舊的投影機，還有許多閒置的VGA線，給了好奇心十足的我們一個好機會來進行實驗，如果我們能夠將色度、飽和度等色彩數據化，或許就能夠得知兩者的差異。為了可以真正了解投影機的原理，我們展開了實驗，並配合精密的測量與數據的探討。

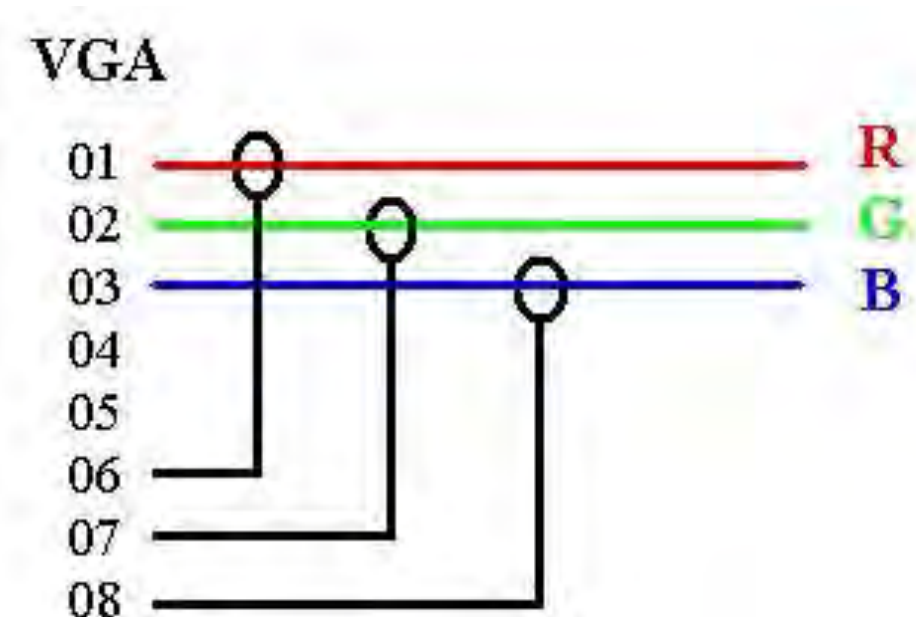
研究目的

- 一、了解不同投影機的原理
- 二、比較不同投影機之間的效果（顯色性、演色性等）
- 三、了解各種色彩分析中會用到的專有名詞
- 四、探討電腦螢幕的藍光強度是否相較投影機強
- 五、探討剪除VGA三原色訊號端子後，不同投影機的結果差異
- 六、比較不同壽命同款投影機的效果

研究設備及器材

VGA線數條、鉗子、LED投影機、傳統投影機數台、雷射投影機、三色雷射筆、三原色LED燈泡、光柵眼鏡、筆記型電腦、光譜精靈軟體、光譜儀、智慧型手機、直尺。

研究方法



CIE-1931(色溫圖)

是本次實驗中，一項用來比較不同光源的判斷工具，除了主波長、色純度可以被明確標示，更可以從中比較色度座標。

相關色溫CCT

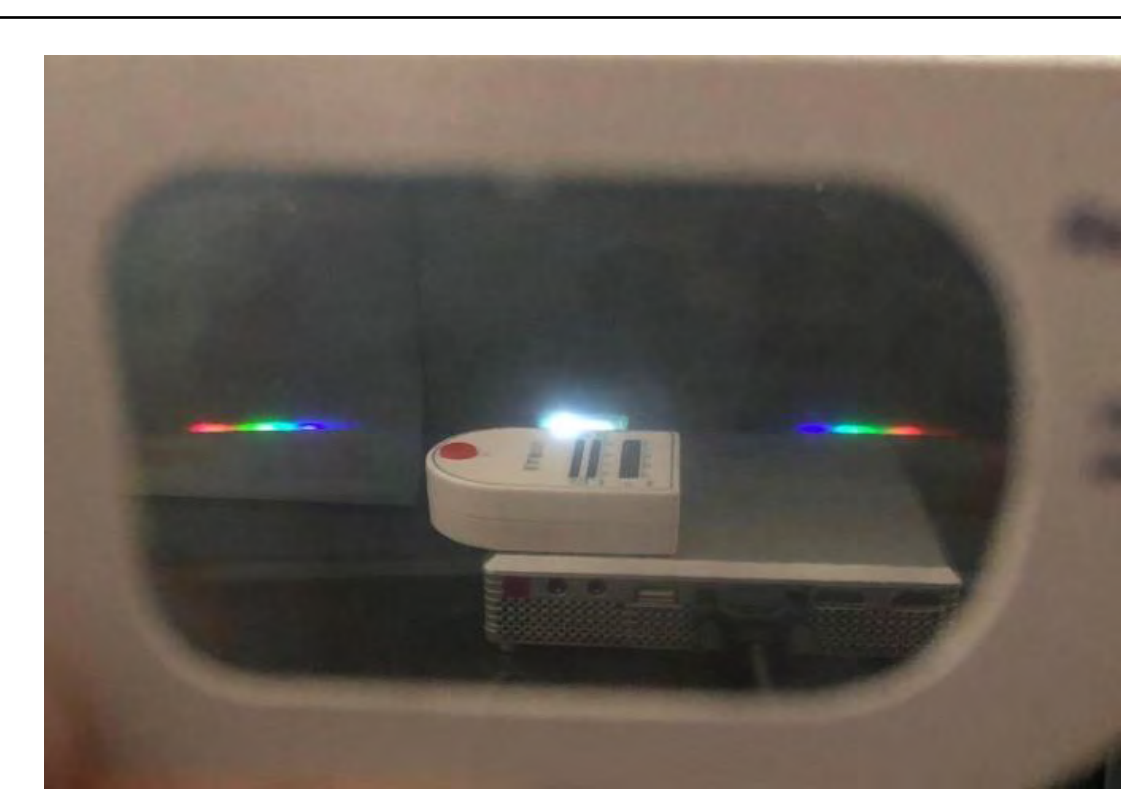
對比它的色彩和理論的熱黑體輻射體來確定的，匹配時的凱爾文溫度就是那個光源的色溫，它直接和普朗克黑體輻射定律相聯繫。

色光三原色

以光源投射時所使用的色彩是屬於「疊加型」的原色系統，此系統中包含了紅(R)、綠(G)、藍(B)三種原色，三原色強度均調至最大並且等量重疊時，則會呈現白色。

演色性CRI

物體在光源下感受與太陽光下感受的真實度百分比，演色性高對顏色表現較逼真。



光柵眼鏡觀察雷射投影機白光小點

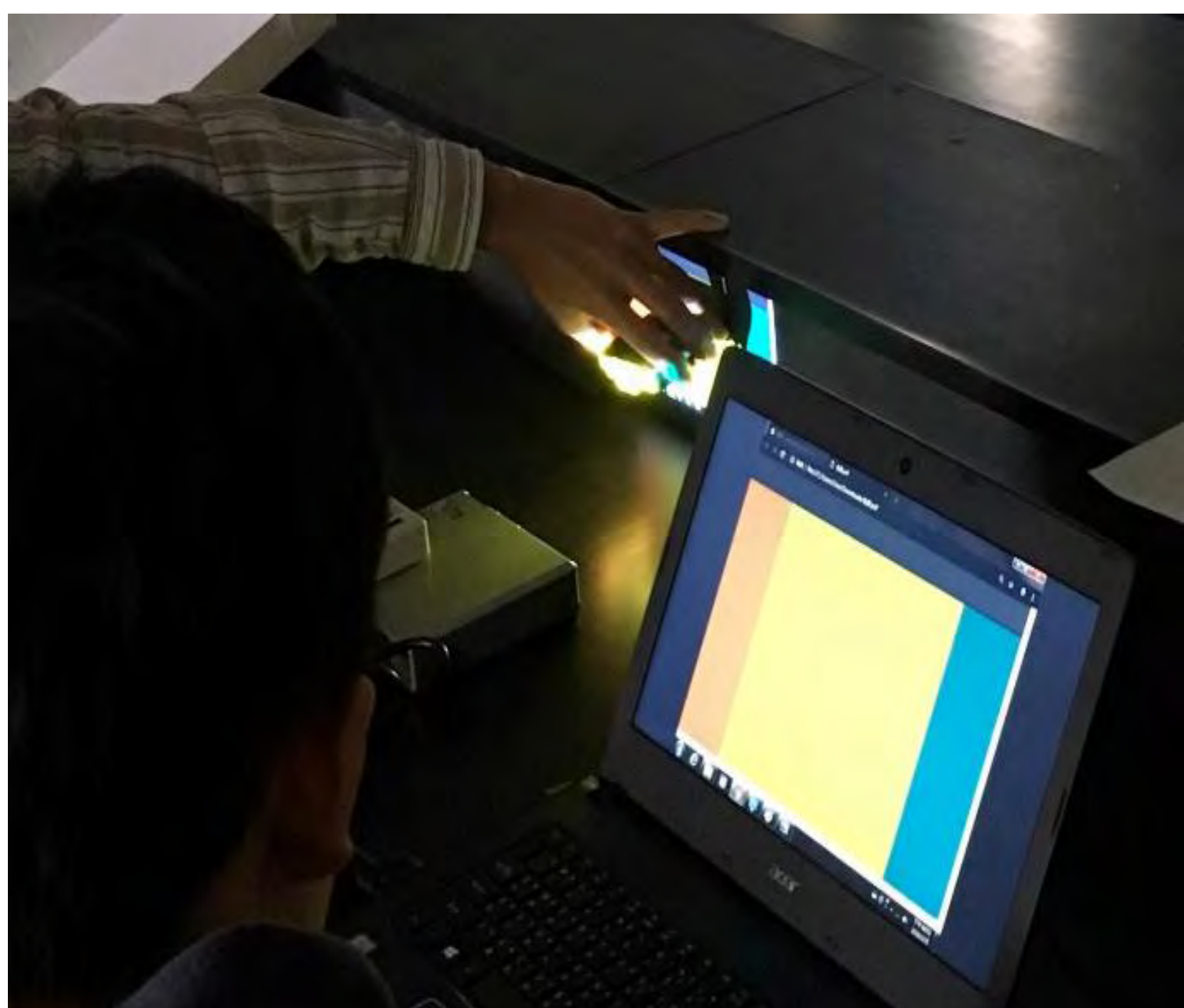
光柵眼鏡觀察LED投影機白光小點

色票



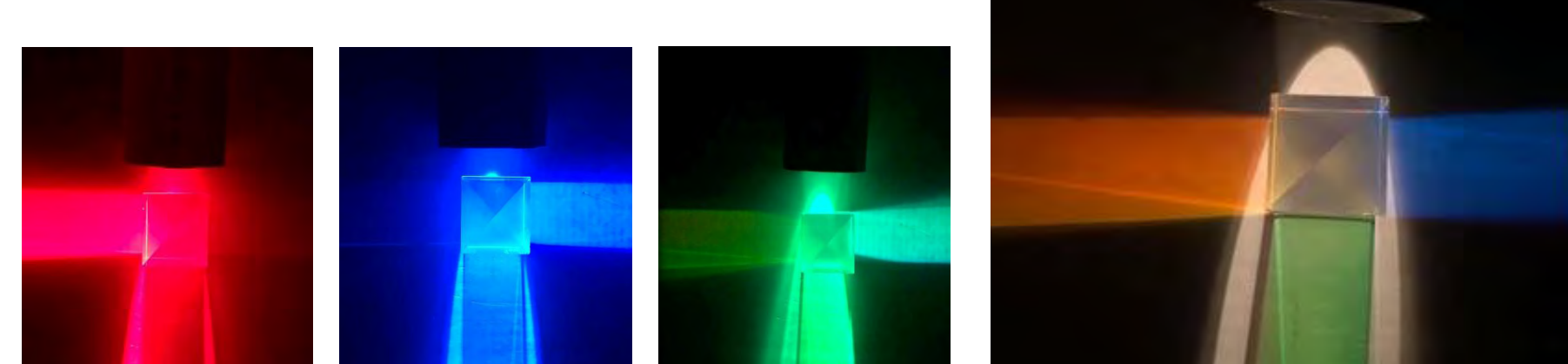
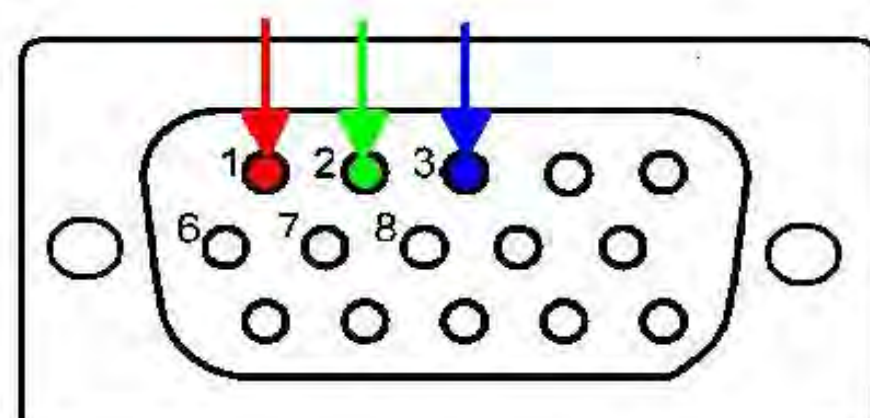
除了RGB三原色外，配合R1-R15的色票做為實驗底色

實驗過程



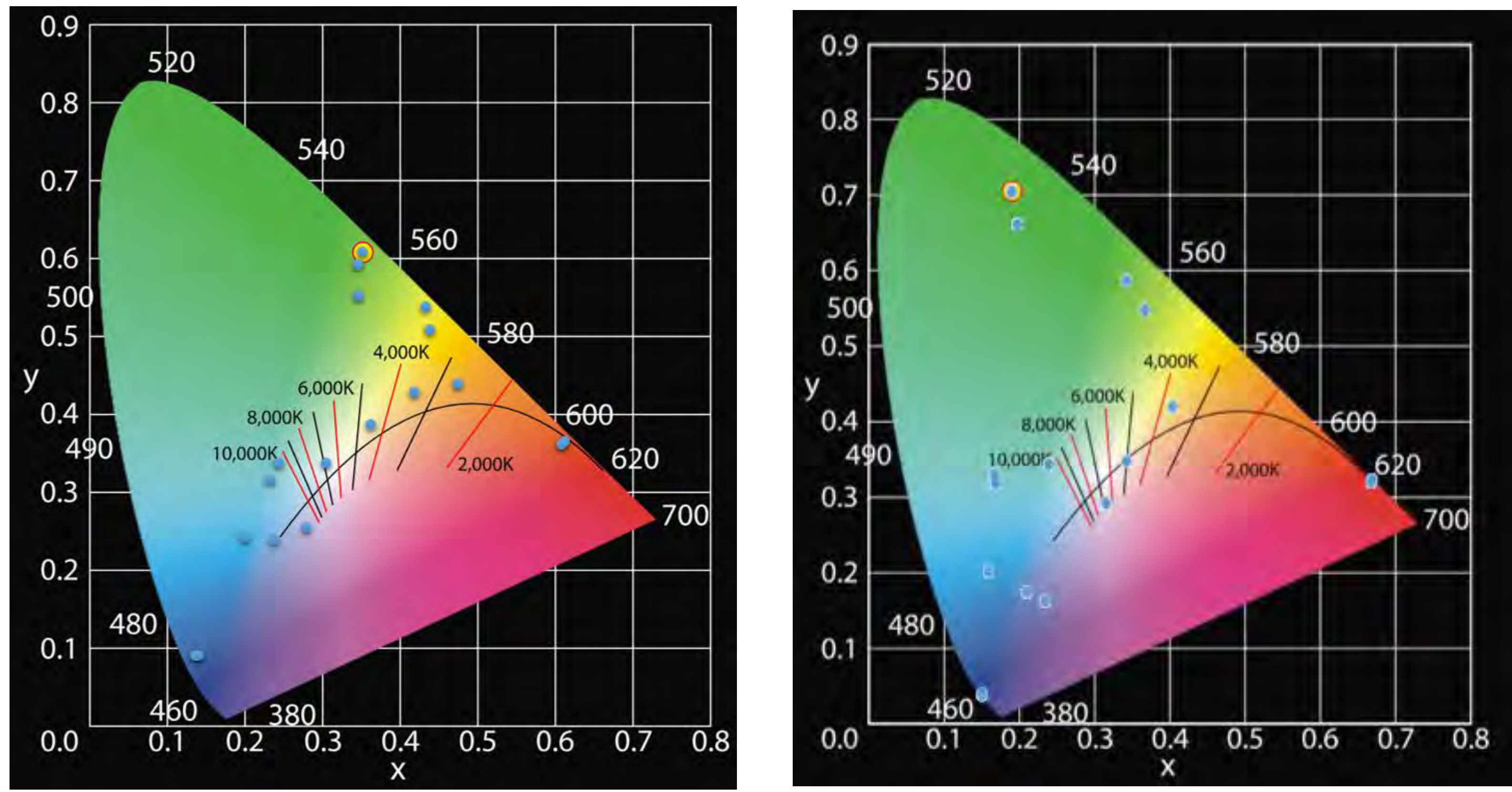
我們選擇在學校的天文教室進行實驗，天文教室可有效防止額外光源影響實驗結果。實驗過程中，我們將光譜儀擺放在投影機前，對每一張色票進行測量，並一一記錄測量結果。

接著我們分別減掉VGA線的1、2、3號端子（紅、綠、藍端子），並用一樣的實驗方法測量其光譜的變化，求證VGA端子的功能與效果是否真如資料上所說。



研究結果

一、傳統投影機與LED投影機



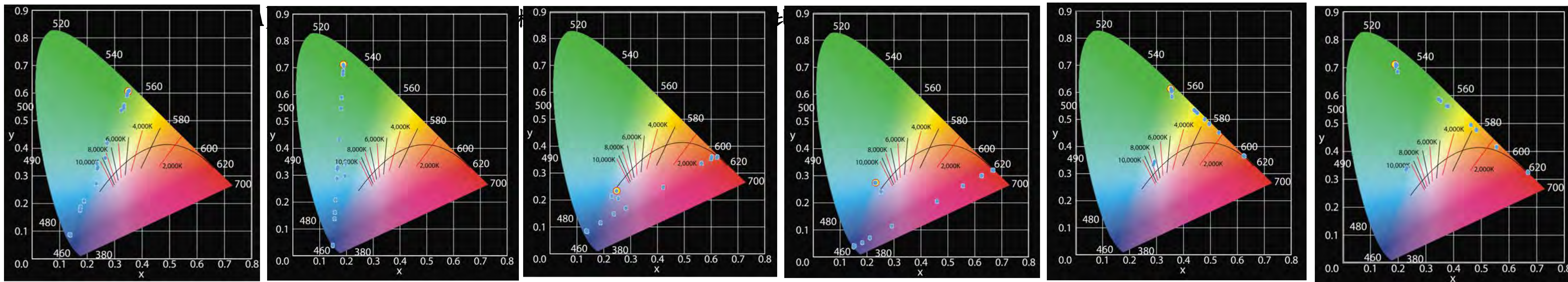
傳統投影機

LED 投影機

一、我們可以透過左圖將 R、G、B 三色票的色度座標連線，對比所形成的三角形區域來比較顯色性優劣，LED 投影機的三角形區域明顯大於傳統投影機，而在綠色顯示上，LED 投影機所投射光的色純度也相對傳統投影機佳。

我們由下方六組圖發現，若把 VGA 線材去 R、去 G、去 B 之後，色度座標皆為 2 種單色光所混合而成的色彩，各色票所呈現的位置為一直線。沒有訊號時，量測到的光點會偏離主線，原因是背景光源接近黑體輻射之背景白光。

二、在此實驗中，色度座標中之綠色純度並非最高，反而其他色票的色度座標顯得「更綠」。所以純綠最靠紅，推測綠光是紅光變頻後的結果。因此，我們推測雷射投影機的綠確實與紅光有高度相關性。



傳統投影機去 R

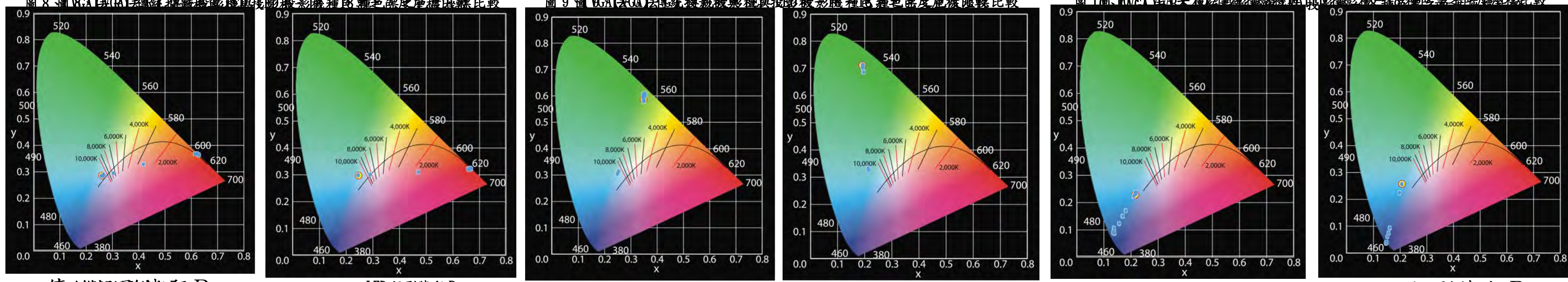
LED 雷射機去 R

傳統投影機去 G

LED 雷射機去 G

傳統投影機去 B

LED 雷射機去 B



傳統投影機留 R

LED 雷射機留 R

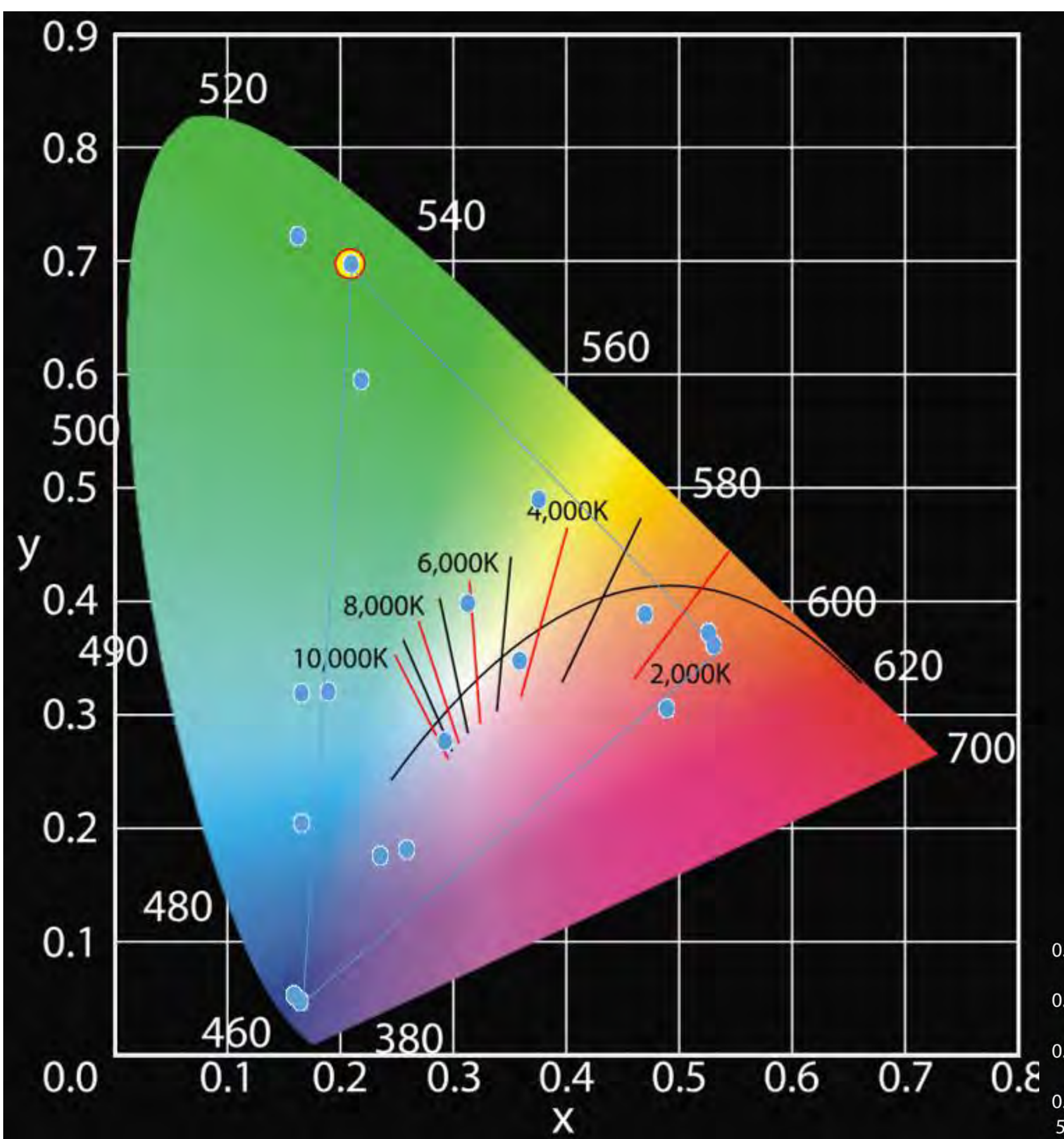
傳統投影機留 G

LED 雷射機留 G

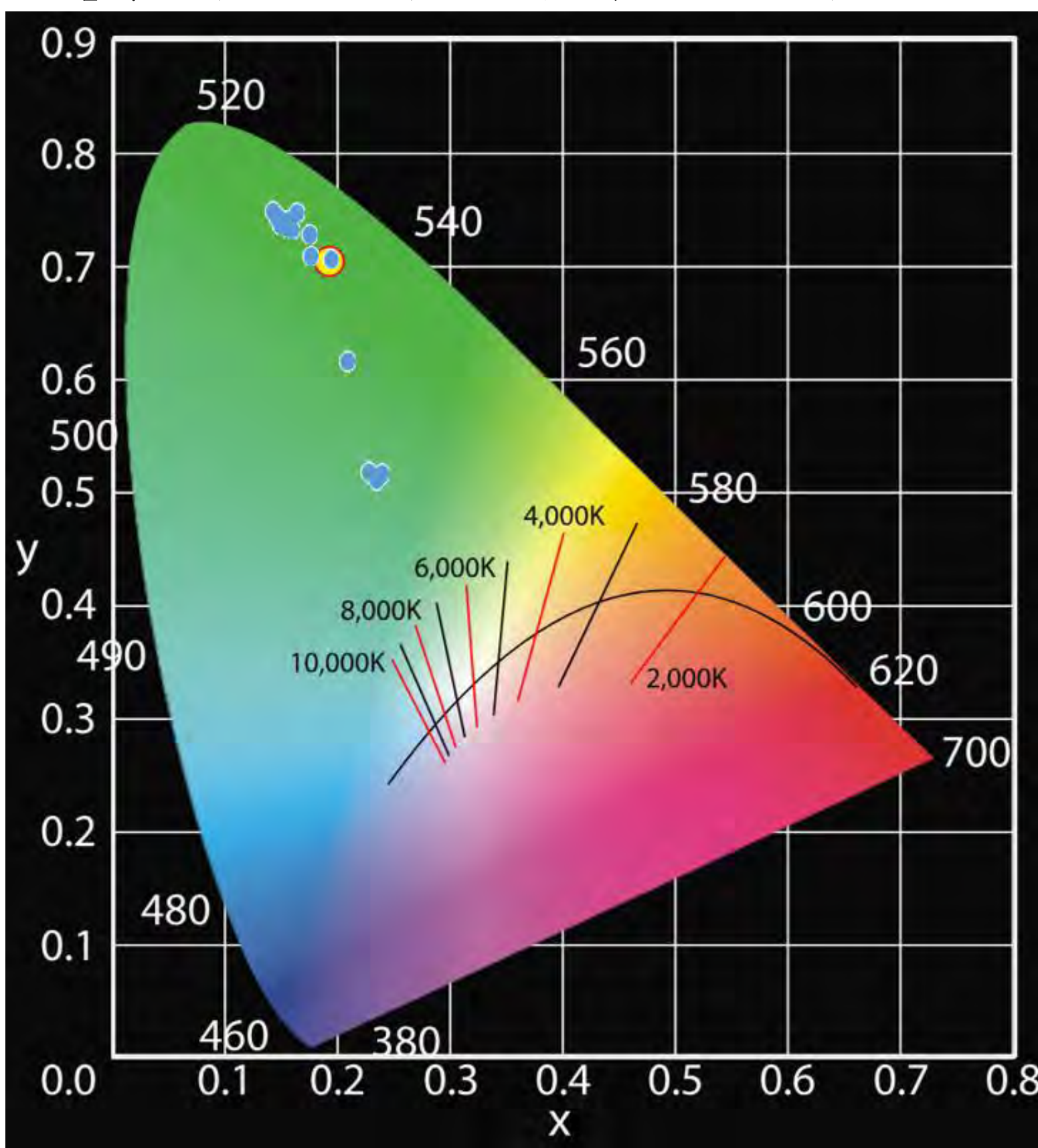
傳統投影機留 B

LED 雷射機留 B

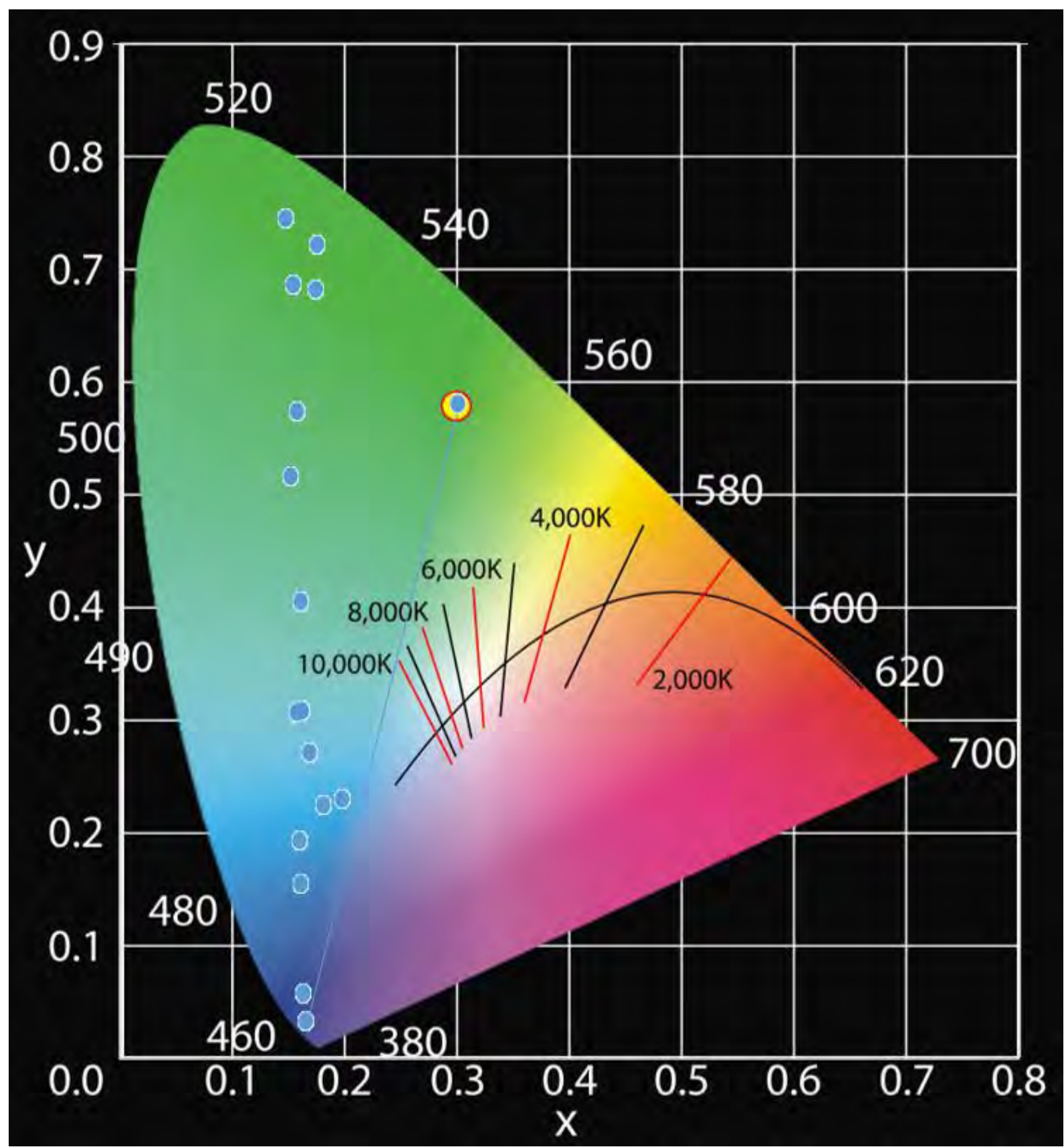
二、雷射投影機探究



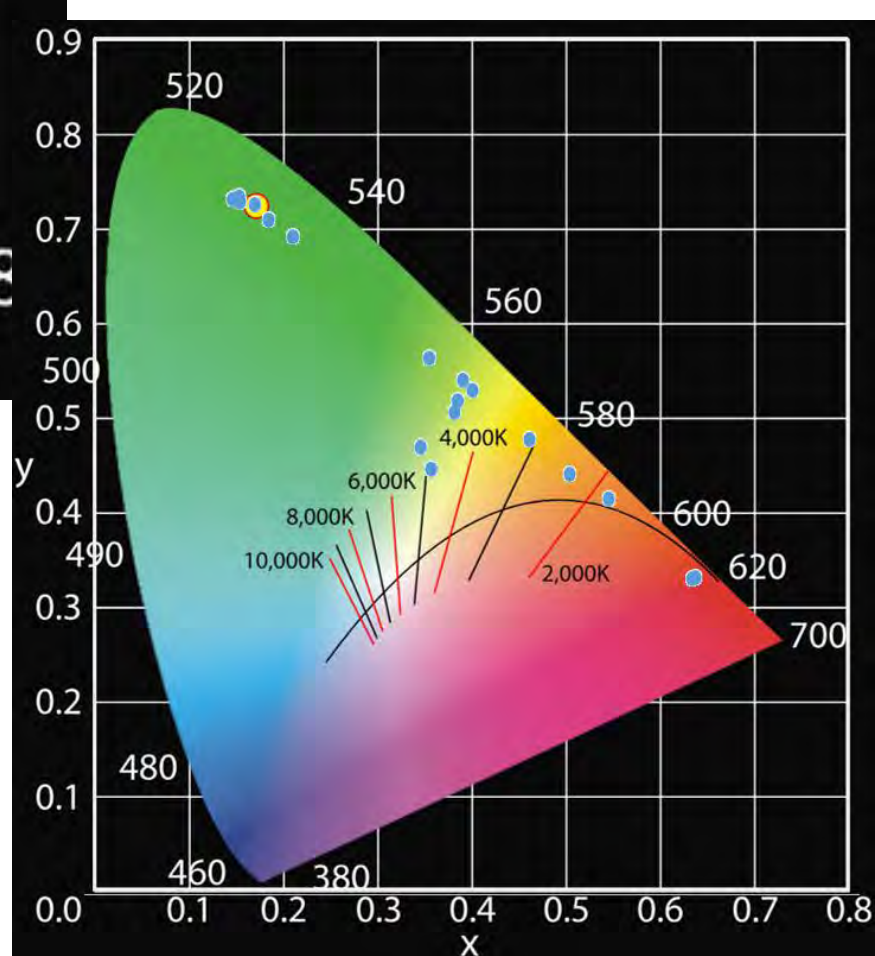
雷射雷射機機8色票合成色溫圖



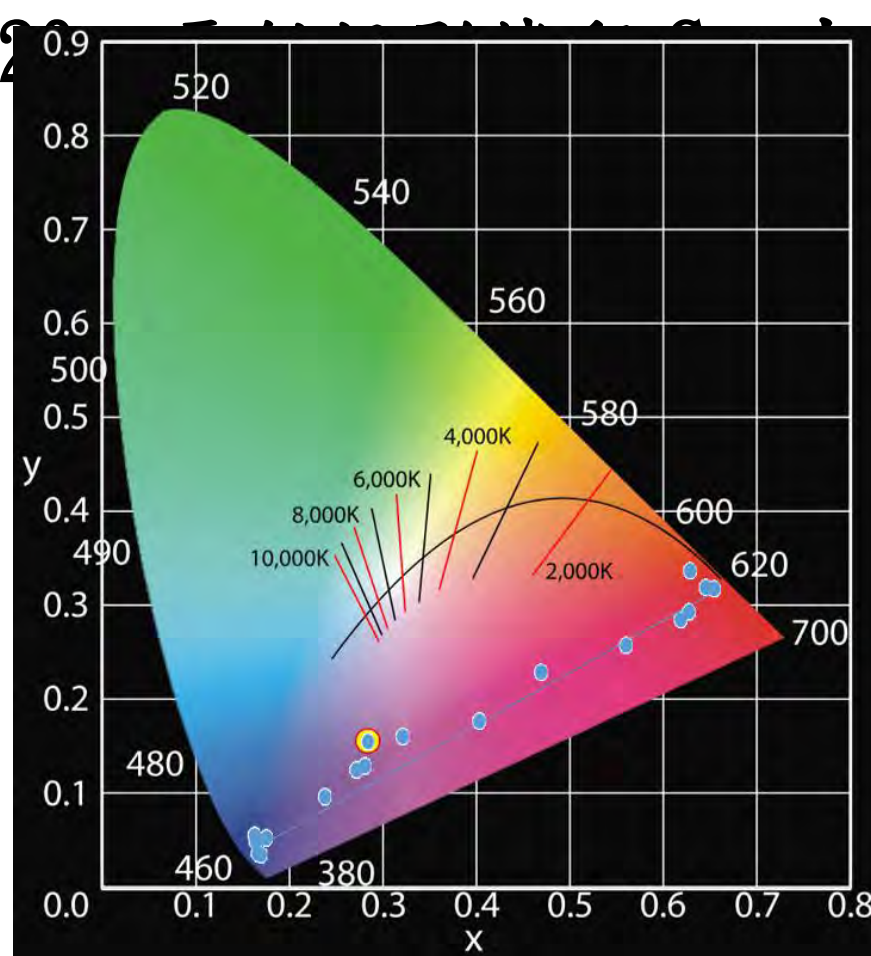
雷射留G。綠愈強 紅愈強。



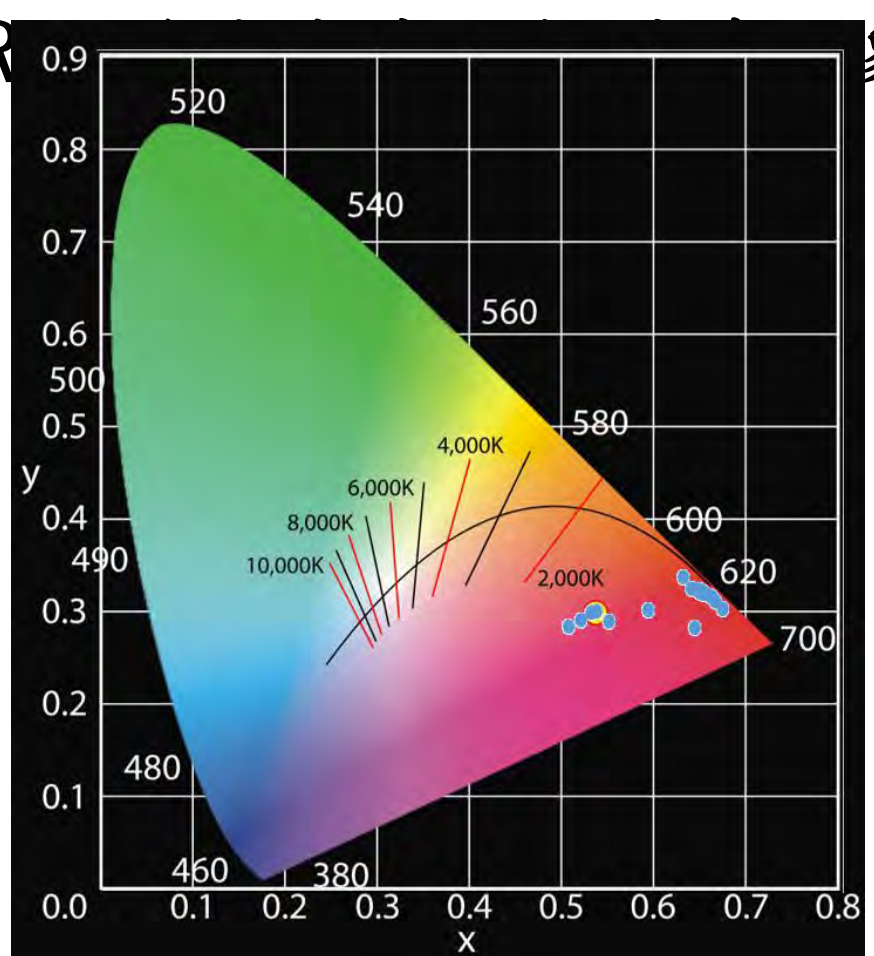
雷射去R。綠光明顯往紅光偏移



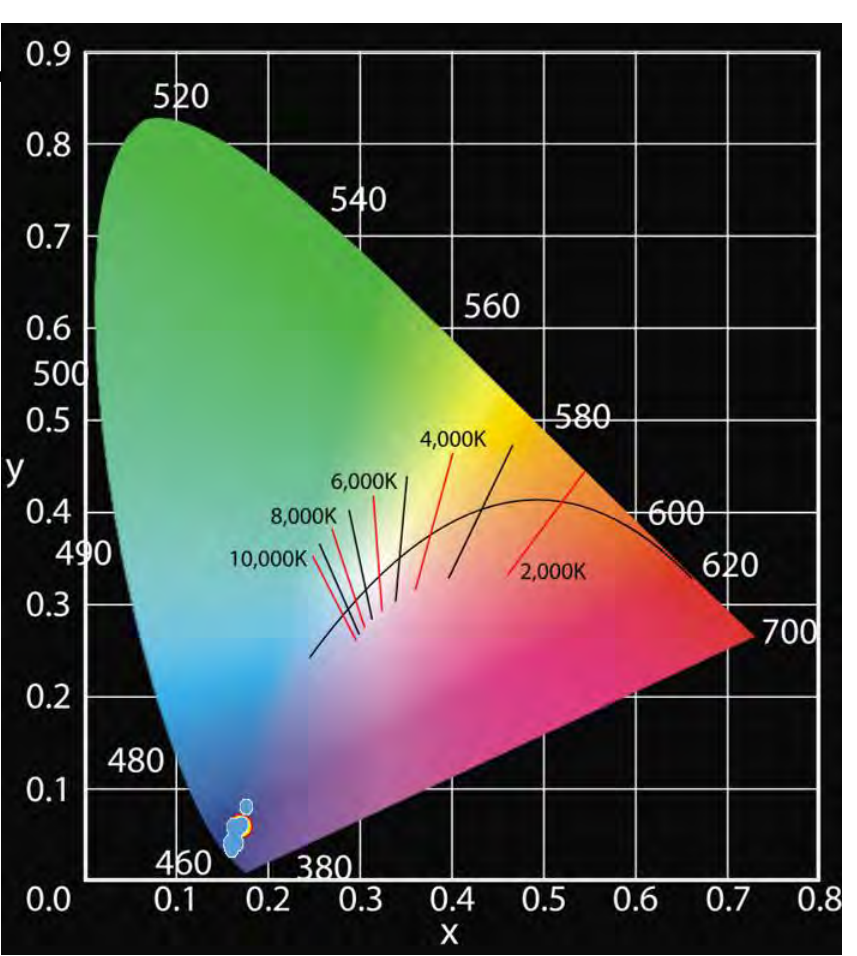
雷射去B



雷射去G

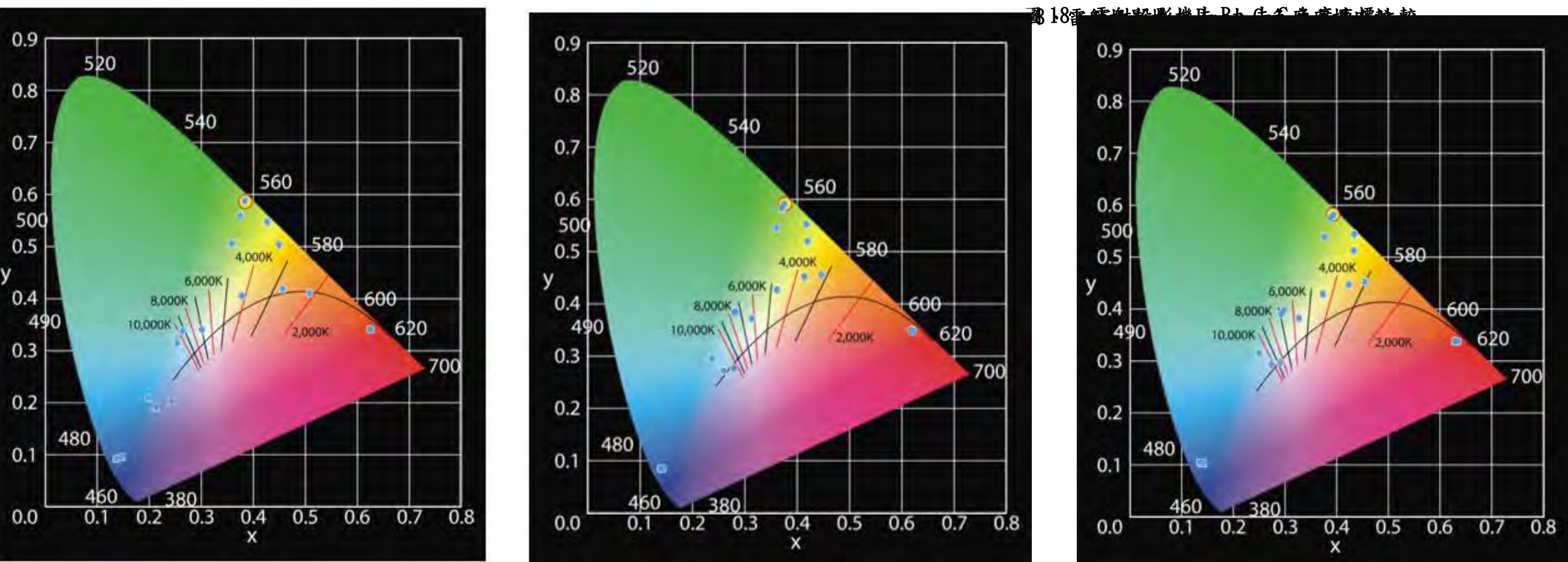


雷射留R



雷射去B

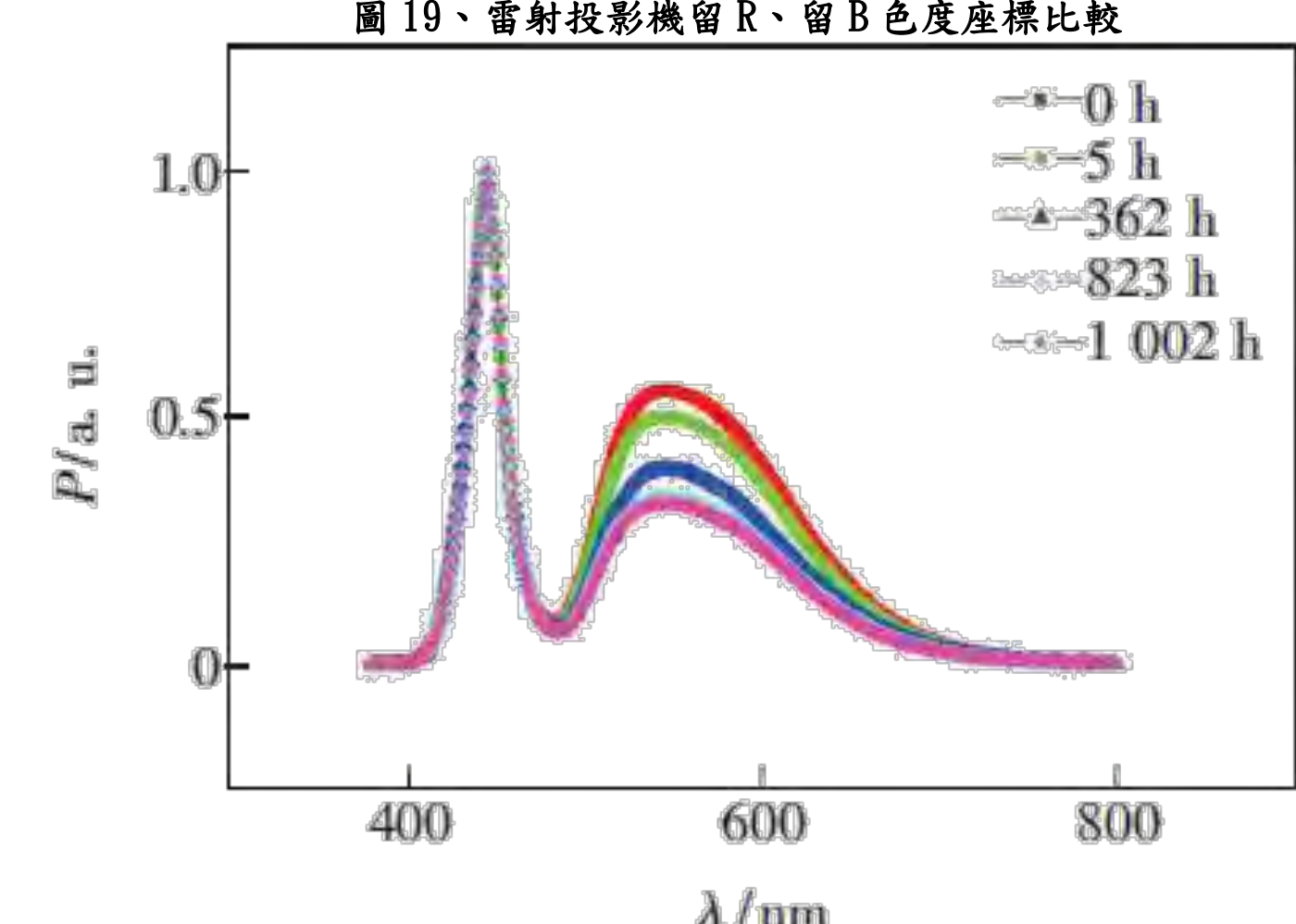
三、傳統投影機之燈泡在不同壽命下的比較



傳統投影機34%

傳統投影機53%

傳統投影機71%

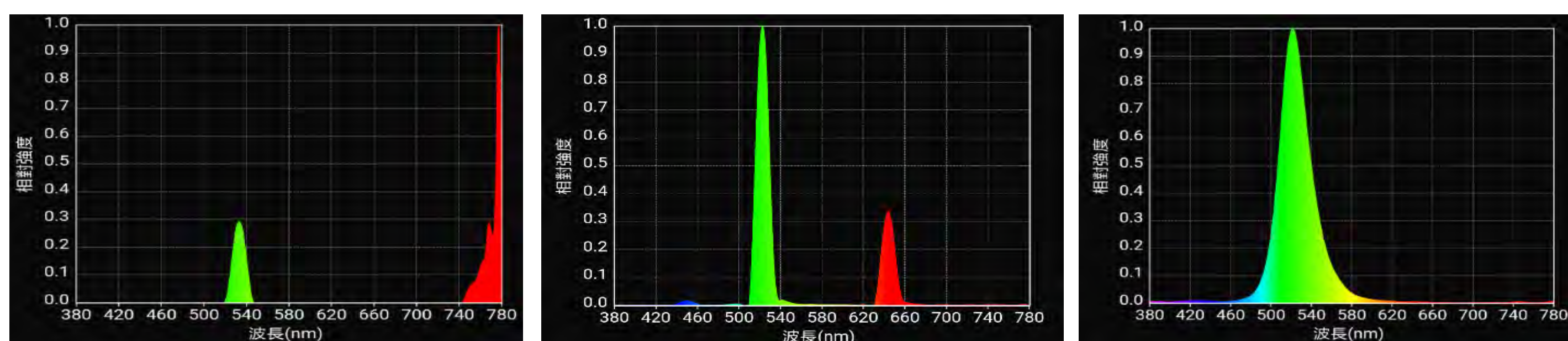


三、當壽命愈小的燈泡在光的色溫度的分佈中，會偏向藍光，表示除了藍光以外，綠光與紅光會隨著燈泡壽命衰減。

討論

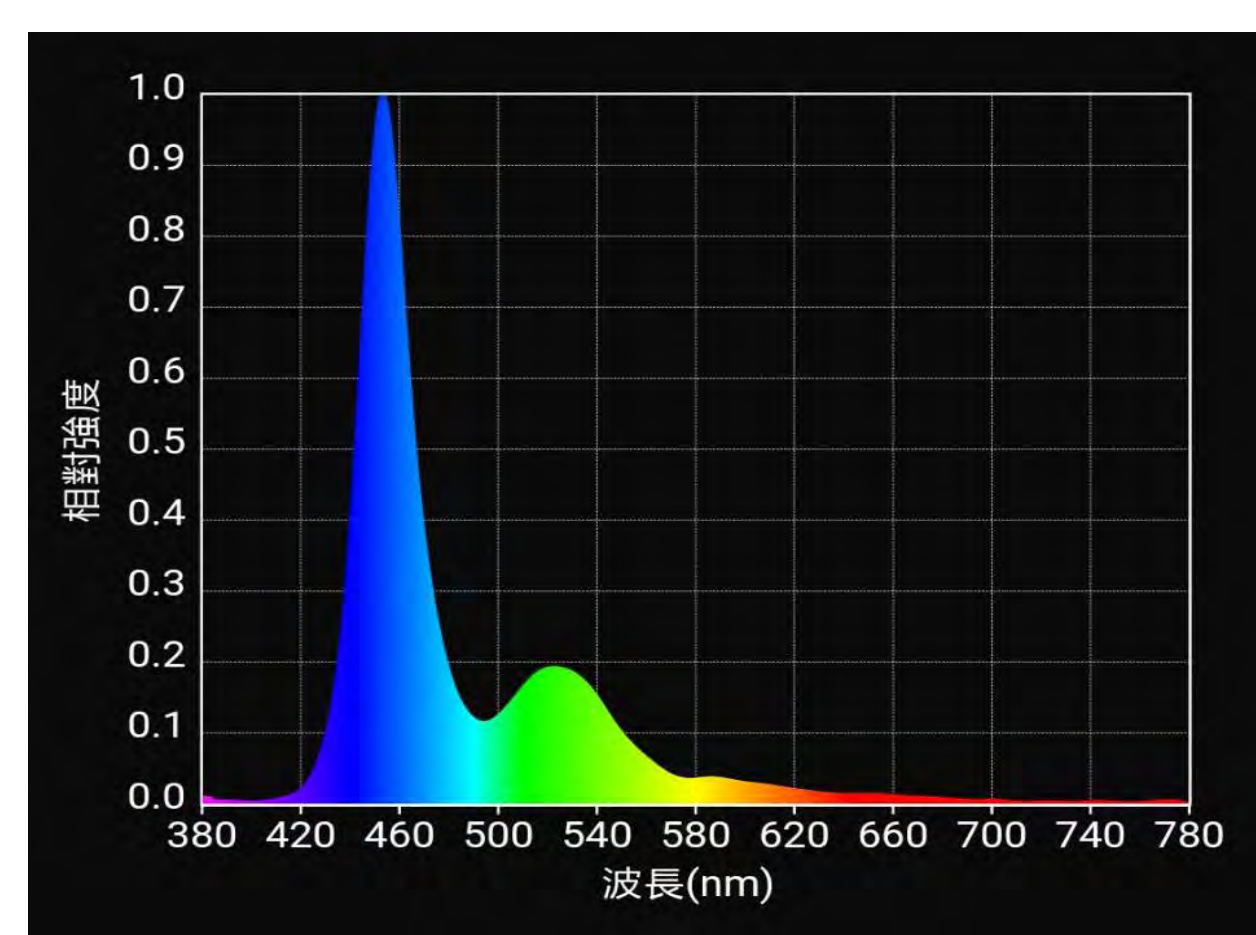
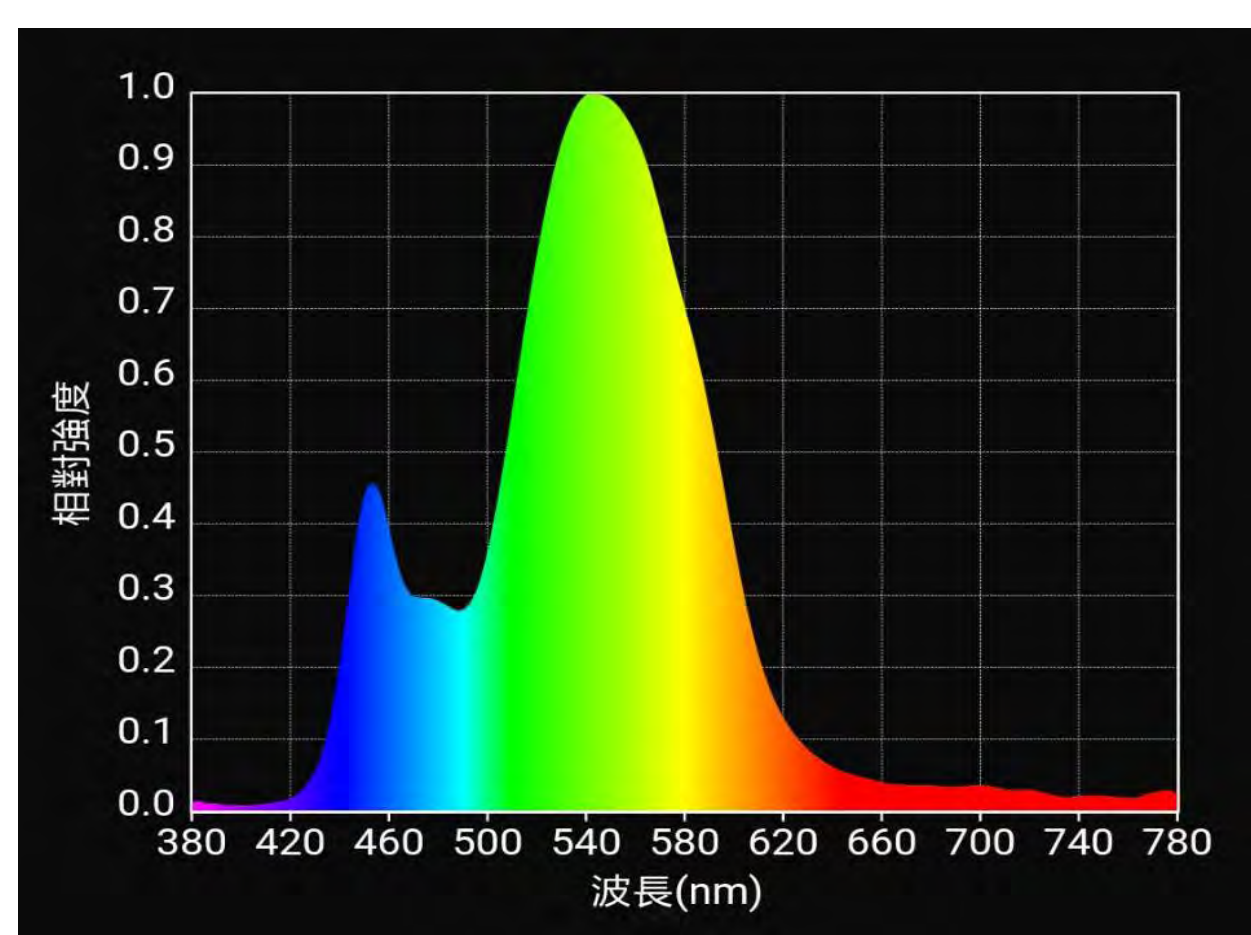
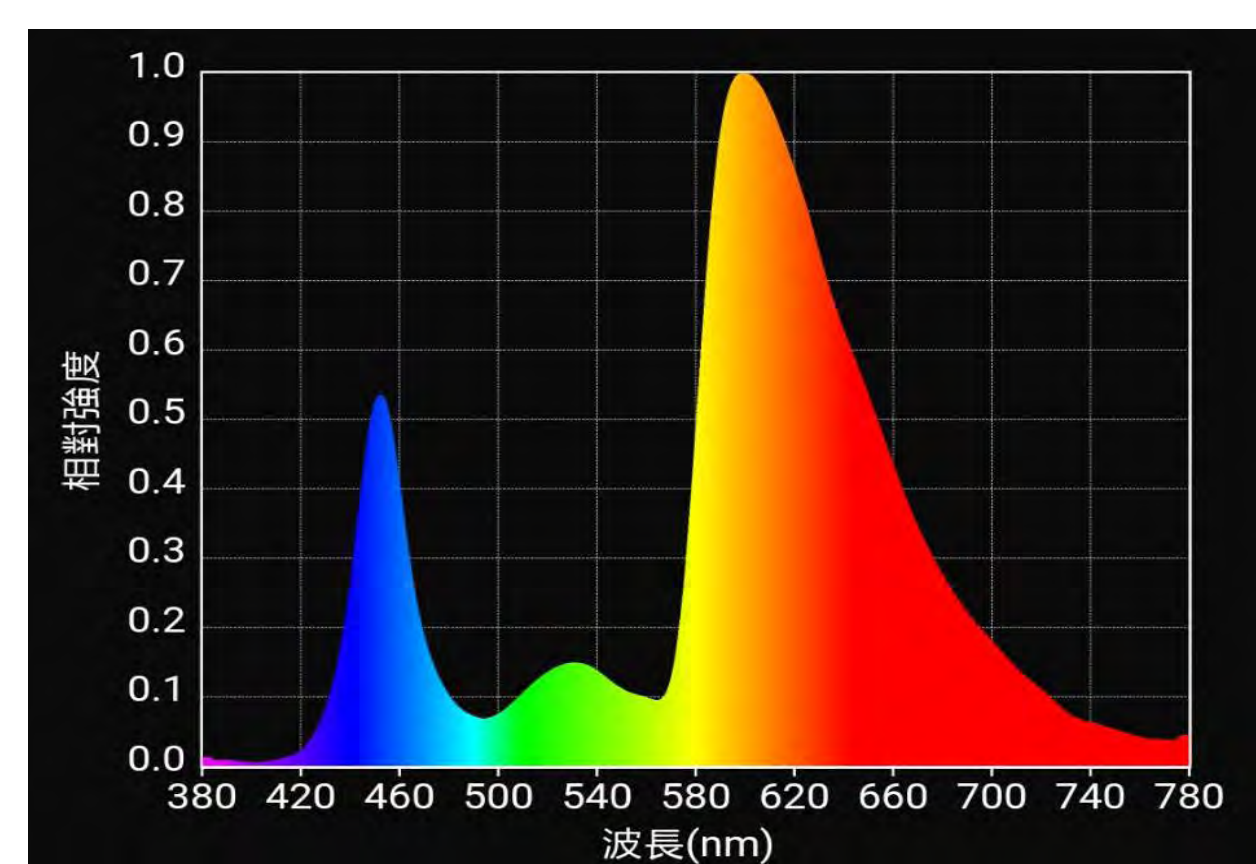
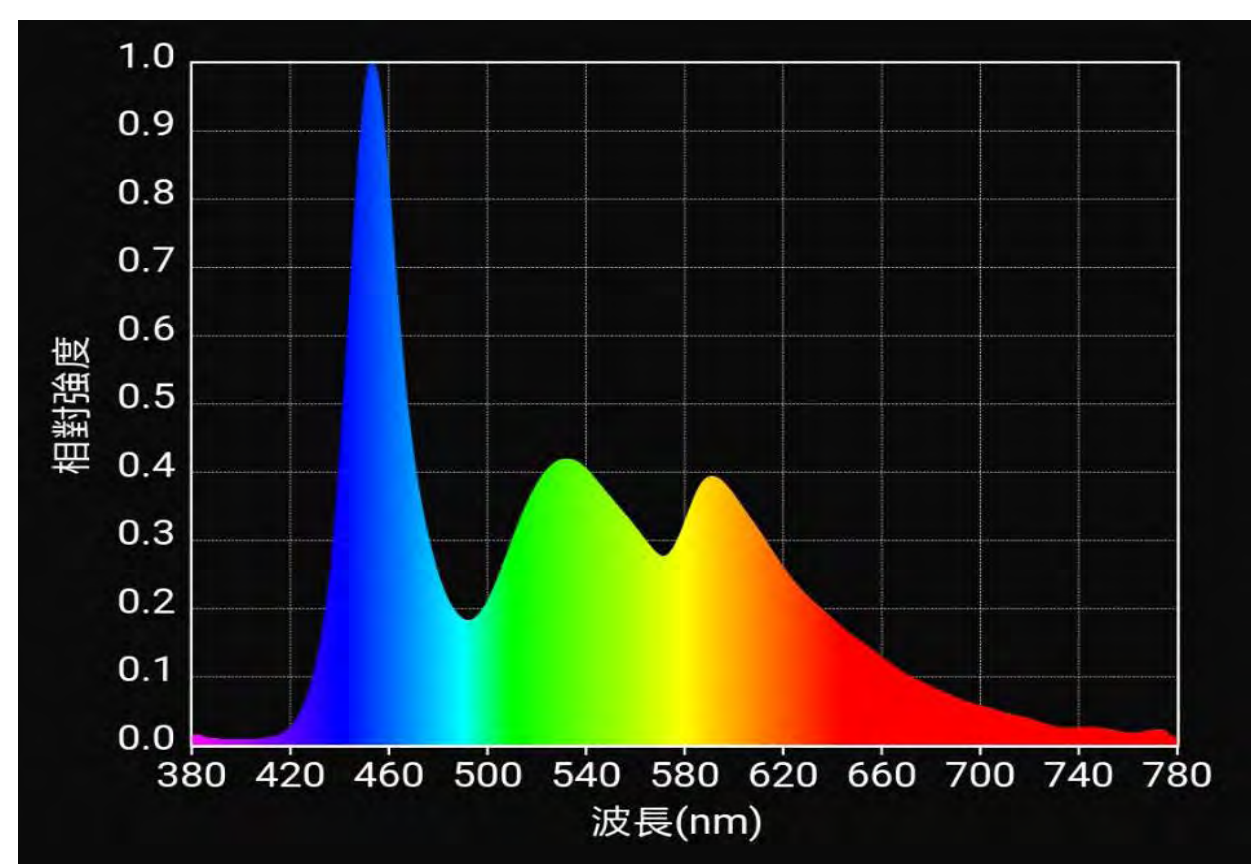
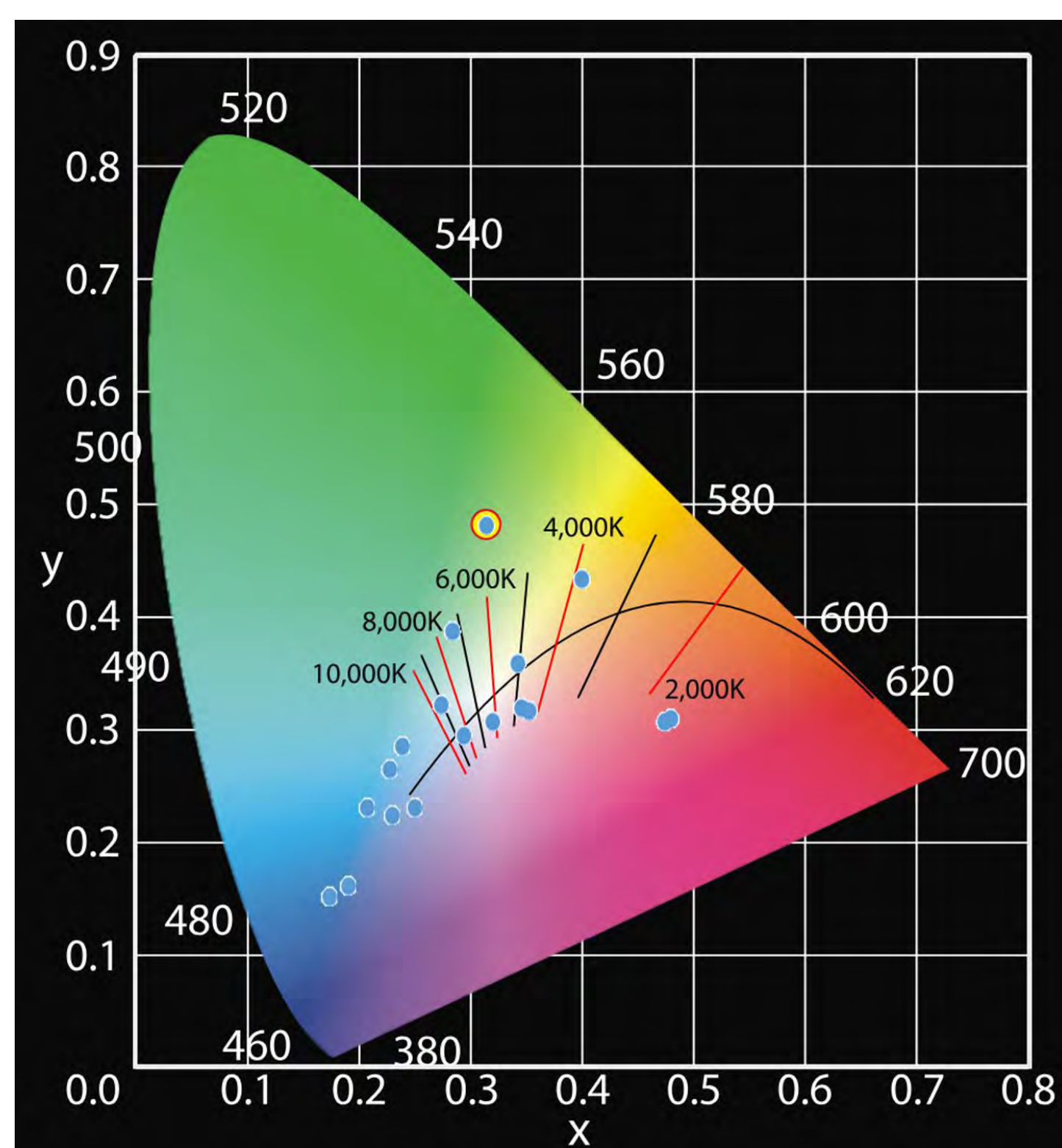
一、LED與雷射筆的綠光特性探討

紅、藍光是二極體雷射，綠光較不一樣，是由紅光波長變頻而來。



目前為止，還是沒有合適的綠色雷射光源，現行的方法是採用紅色雷射光通過一個按照正弦波震盪的石英，藉此使頻率倍增，從而得到波長大約為540nm的綠色雷射光，因為這種方式需要較高的溫度，導致綠光無法穩定的輸出；此外，用以產生綠光的模塊體積大、價格高，連帶提高了雷射光源的成本，造成售價居高不下的問題。

二、電腦螢幕與投影機差異

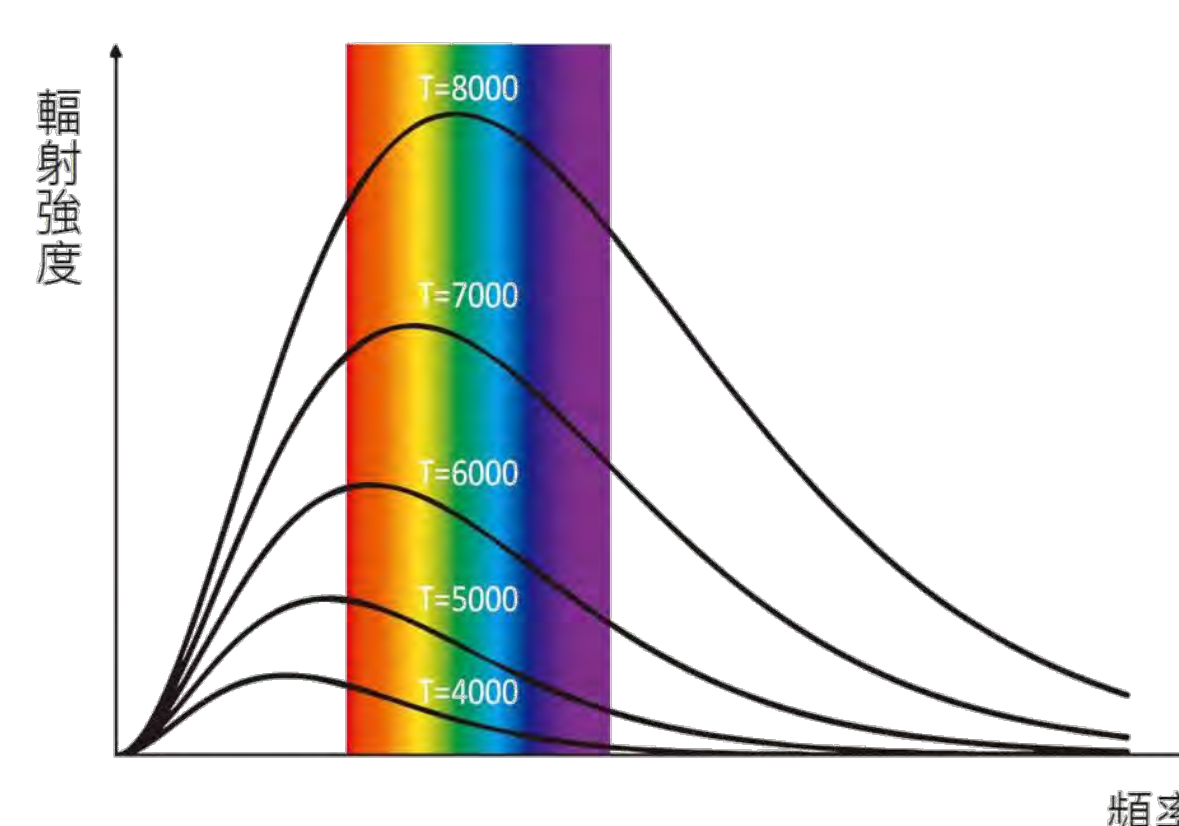
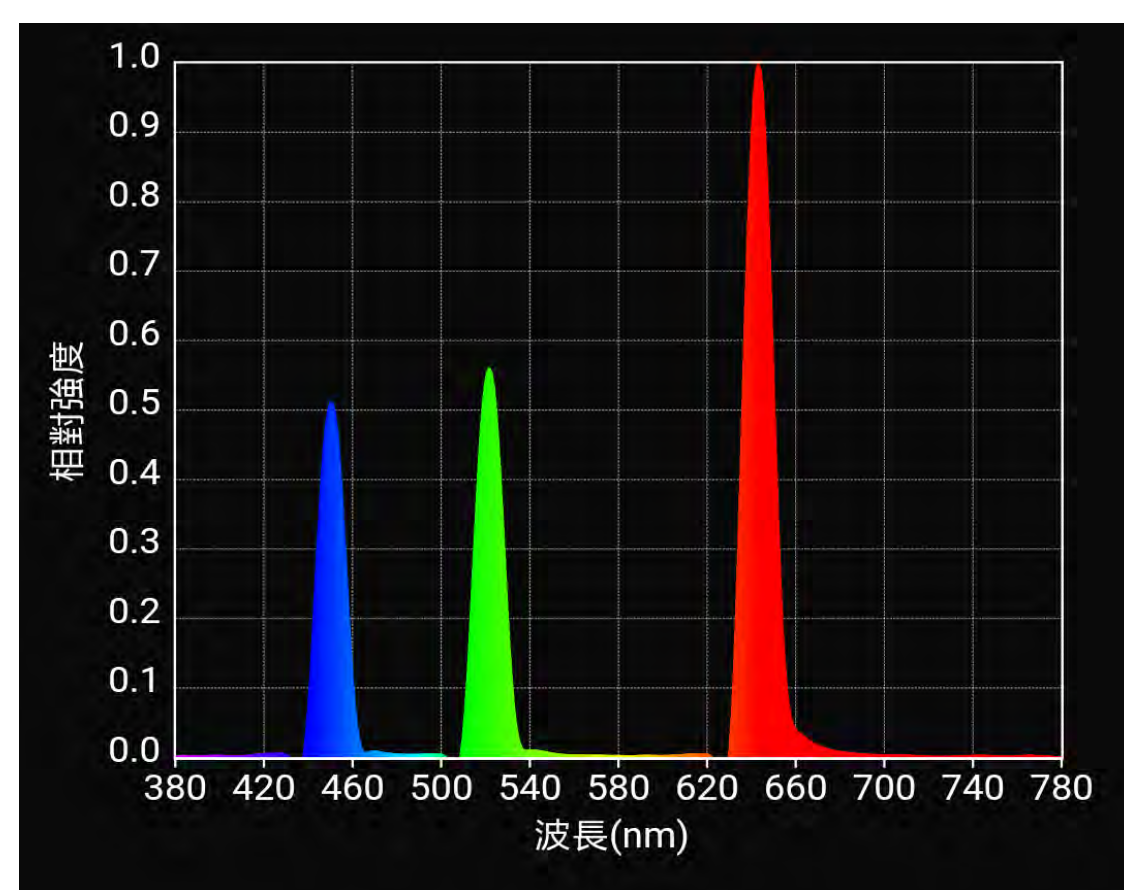
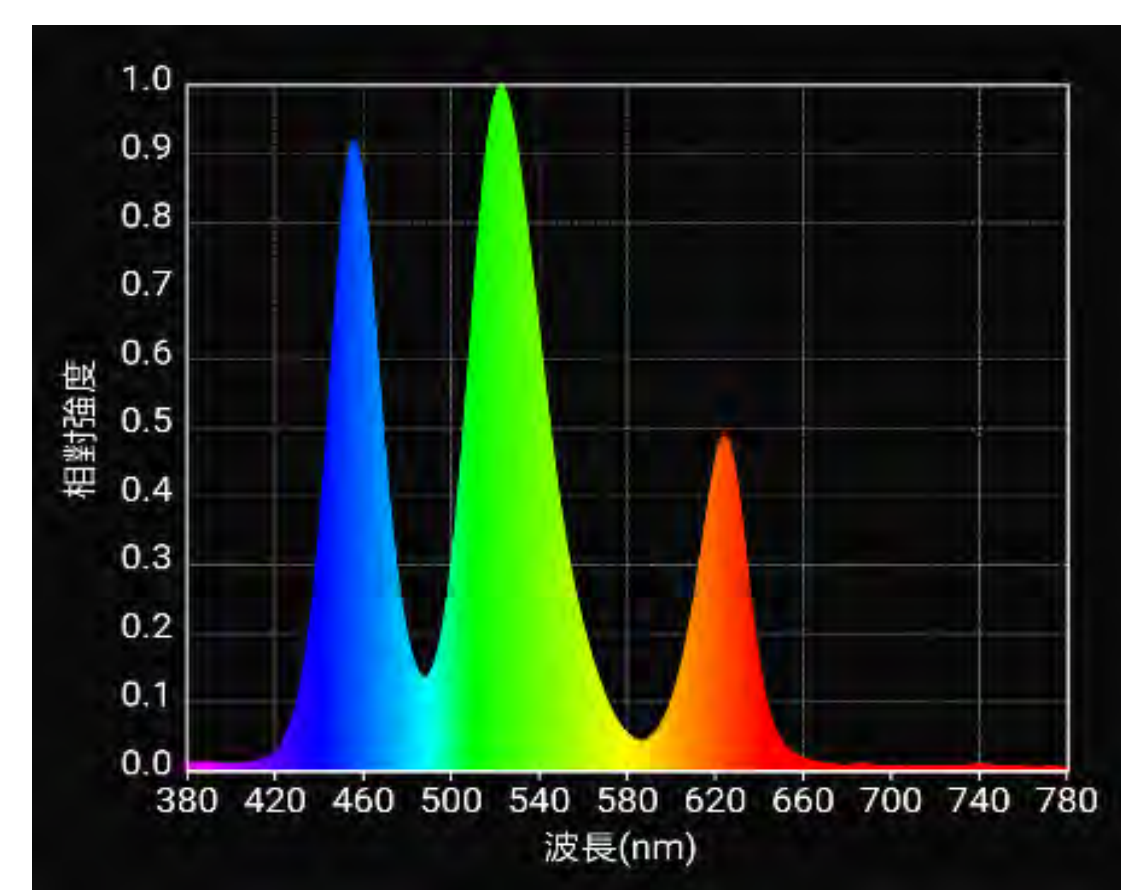
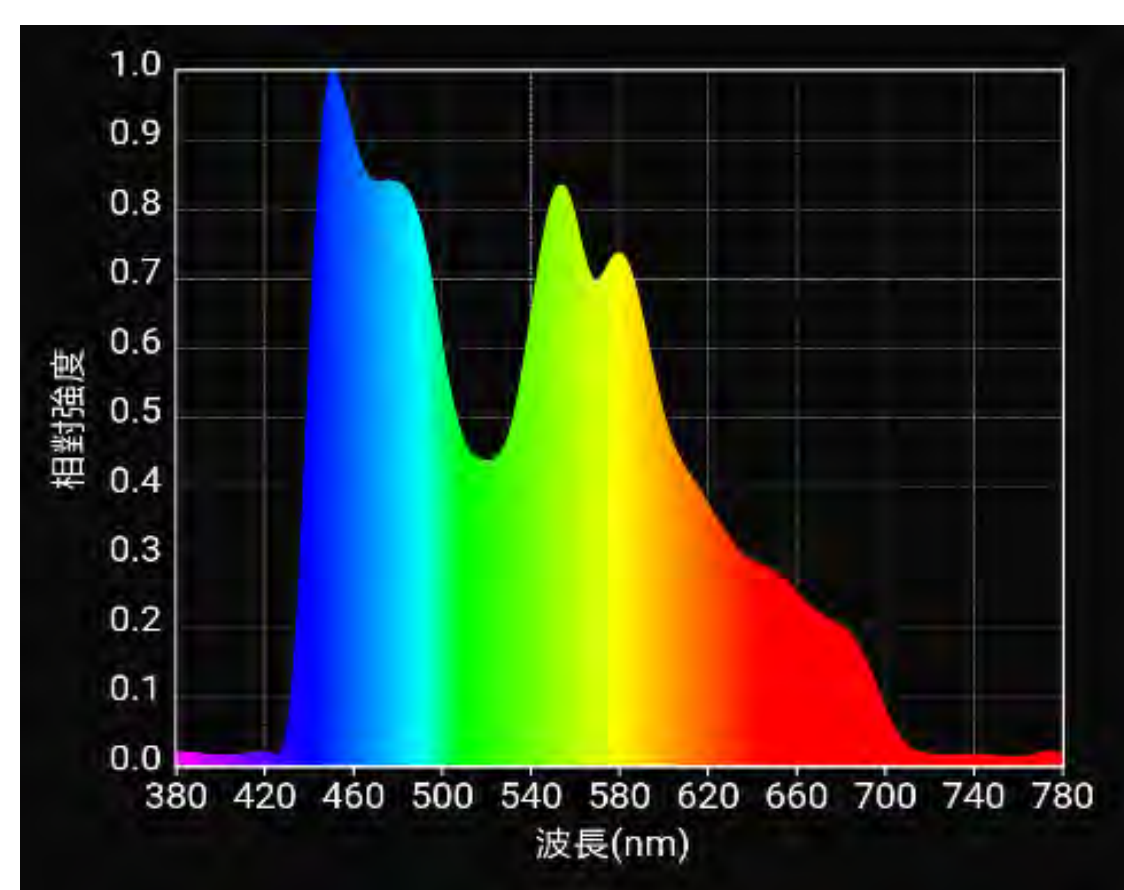
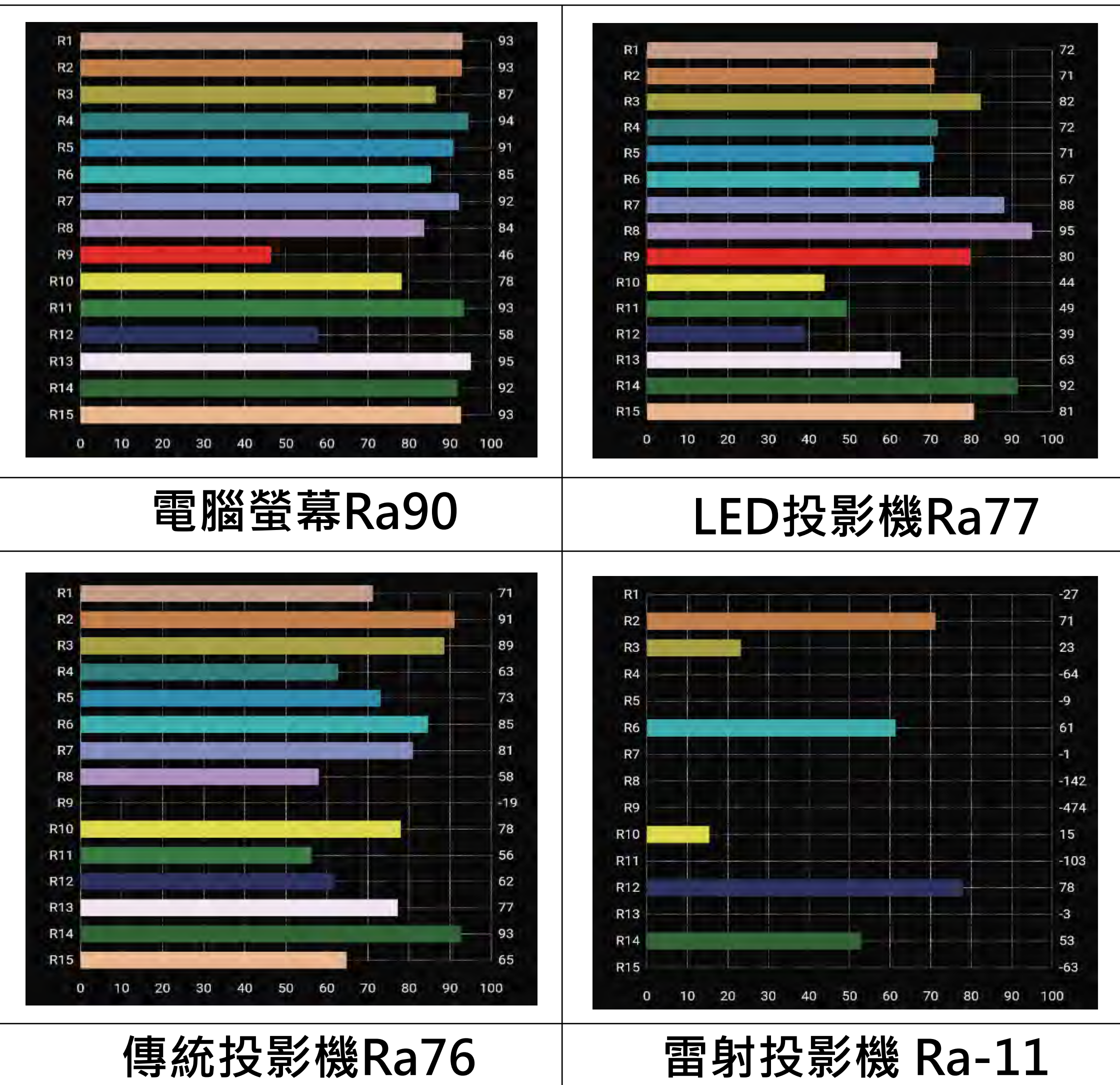


電腦螢幕所有色票之色度分佈

電腦螢幕 綠光

電腦螢幕 藍光

三、演色性(Color rendering)的探討



我們針對傳統投影機、LED投影機、雷射投影機及螢幕顯示器的光譜來綜合比較。由左上圖可知，雷射投影機有多數色票顯示的相對強度為-11，因此，雷射投影機雖然有很好的顯色效果，但若拿來做為光源照明時，演色性會是最差的。綜合我們實驗的光譜圖來看，傳統投影機與LED投影機皆有類似黑體輻射形狀的分佈，而雷射投影機則只有3個明顯強度的色光，因此以演色性的定義而言（太陽照明後的效果定為Ra100）來對照，就無法還原太陽底下物體的色澤。

結論

- 一、投影機的顯色性可由三原色的色度座標連線所形成的三角形區域比較，雷射投影機與LED投影機的顯色性最好，其次是傳統投影機，最差的是電腦螢幕。
- 二、若將VGA三原色傳輸端子之一剪除，色度座標結果即會是一直線，若只保留VGA三原色傳輸端子之一，色度座標結果則會是原色光往背景白光延伸，顯示投影機是用色光疊合的原理顯示色彩。
- 三、雷射投影機的綠光是由紅光變頻而來，與其他類型投影機不同。並由雷射筆實驗重複驗證。
- 四、電腦螢幕的藍光峰值明顯突出，顯現藍光強度較強，但是演色性Ra最好。
- 五、投影機的演色性由演色指數（CRI）表示，電腦螢幕、傳統投影機與LED投影機的光譜較接近黑體輻射光譜，因此演色性較好；然而雷射投影機只有三個色光，且半寬波長極窄，所以雷射投影機的演色性最差。
- 六、同型號不同壽命的投影機，當燈泡壽命越短，其色度座標分佈會偏向藍光。